



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Lada Sokolova

## Venäjän standardit ja betonilujuus- koemenetelmien tulospoikkeamat

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustuotantotekniikka

Insinöörityö

11.10.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Lada Sokolova Betonin lujuus: Venäjän standardit ja eri koemenetelmien tulospoikkeamat 70 sivua + 2 liitettä 19.08.2019 – 11.10.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennustuotantotekniikka
Ohjaajat	Lehtori Juha Virtanen Tuotannon ja laadun ohjaaja Hannu Laitinen, Lujabetomix LLC
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää poikkeavuudet, joita esiintyy betonin puristuslujuutta selvitetessä eri koemenetelmillä. Tutkimus toteutettiin yhteistyössä Pietarissa toimivan suomalaisomistaman Lujabetomix LLC betonitehtaan kanssa, jonka säännöllisen laadunvalvonnan lisäksi suoritettiin myös työmaakäytäntöjen mukaisia betonin lujuustestejä. Sitä varten tehtaalla valettiin kaksi isompaa koepalkkia, jotka testattiin kolmella menetelmällä.</p> <p>Tutkimuksessa rajoituttiin neljään koemenetelmään: tehtaalla esivalmistettujen koekappaleiden lisäksi valmistettuja koepalkkeja testattiin ulosvetokokeilla, otettiin koepalkeista poranäytteitä puristuskokeita varten ja lisäksi määritettiin lujuus ultraäänen etenemisnopeuden perusteella. Vertailua varten kaikki koetulokset muunnettiin vastaamaan 150 mm virallista kuutiolujuutta, jota käytetään sekä Suomessa että Venäjällä. Kokeiden suorittaminen ja tuloksien muuntaminen tapahtui Venäjän voimassaolevien standardien mukaan.</p> <p>Johtopäätöksissä todettiin, että betonin puristuslujuuden määrittäminen ultraäänen etenemisnopeuden perusteella voi osoittautua alkuvaiheessa hankalaksi, koska nopeuden ja betonin puristuslujuuden vastaavuuden selvittäminen saattaa epäonnistua ja silloin joudutaan tekemään lisää kokeita. Lisäksi havaittiin, että samasta testauskohdasta otetut poranäytteet voivat näyttää hyvin erilaista ominaispuristuslujuutta, joten poranäytteitä on syytä olla edes yksi enemmän kuin normien mukainen vähimmäismäärä.</p> <p>Tutkimus antoi aihetta kahdelle jatkotutkimukselle. Toisen ajatuksena on tarkimman epäsuoran koemenetelmän selvittäminen betonin puristuslujuutta arvioitaessa, mitä varten täytyy rakentaa useampi vastaavuus useammalle epäsuoralle koemenetelmälle useamman suoran koemenetelmän perusteella. Toisessa tutkimuksessa voitaisiin selvittää ulosvetokokeen luotettavuus testaamalla lujuudeltaan samanlaisia betoneja, joiden muut ominaisuudet kuten ilmamäärä ja maksimiraekoko ovat erilaisia.</p>	
Avainsanat	betoni, lujuus, lujuuskokeet, rakennusnormit, koemenetelmät

Author Title Number of Pages Date	Lada Sokolova Concrete Strength: Russian Standards and Results' Differences in Different Test Methods 70 pages + 2 appendices 19 <sup>th</sup> August 2019 – 11 <sup>th</sup> October 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Construction and Site Management
Instructors	Juha Virtanen, Senior Lecturer Hannu Laitinen, Production and Quality Manager
<p>The purpose of this final year project was to define differences between the results of various concrete strength test methods for the same concrete at a Finnish-owned concrete factory in Russia. For re-search purposes, two bigger test beams were casted in addition to the normal quality test cubes. The beams were tested with three methods used on Russian construction sites.</p> <p>Four strength test methods were used: pre-casted test cubes, pullout strength test, cored specimens test and ultrasonic pulse velocity test. The results were converted, according to Russian standards, to correspond with 150 mm cubic strength, an official concrete strength unit in both countries.</p> <p>The study showed that if the correlation between ultrasonic pulse velocity and another test method fails at the beginning, the definition of concrete strength on the basis of ultrasonic pulse velocity can be difficult. In addition, the research showed that the results of cored specimens can differ even when taken from the same place of a structure. Therefore, at least one extra specimen in addition to the minimum required by standards should be taken.</p> <p>This thesis shows a need for further study, first, to define the most accurate non-straight test method by finding correlations between straight and non-straight methods, and second, to verify the reliability of the pullout strength test by testing same strength class concretes with different features.</p>	
Keywords	concrete, strength, strength tests, construction standards, test methods

# Sisällys

## Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Betoni rakennusmateriaalina	2
2.1	Betonin käytön historiaa	4
2.2	Betonin osa-aineet	5
2.2.1	Sementti	5
2.2.2	Kiviainekset	6
2.2.3	Vesi	7
2.2.4	Lisäaineet	8
2.3	Betonin ominaisuudet	8
2.3.1	Puristuslujuus	8
2.3.2	Pakkasenkestävyys	9
2.3.3	Vesitiiveys	14
2.3.4	Muut tärkeät ominaisuudet	16
2.3.5	Venäjän betonimerkinnot	16
3	Betonin puristuslujuuden osoittaminen	17
3.1	Esivalmistetut koekappaleet	18
3.2	Rakenteesta poratut koekappaleet	20
3.3	Ultraäänen etenemisnopeus	23
3.4	Kimmoarvo	24
3.5	Ulosvetovoima	25
3.6	Venäjän standardit betonin lujuuden osoittamisessa	27
4	Ongelman kuvaus ja tutkimussuunnitelma	28
4.1	Ongelman taustaa	28
4.2	Tutkimustoimenpiteiden suunnitelma	29
5	Tutkimuksen kulku	30
5.1	Valmistelut tehtaalla	30
5.2	Koekuutioiden ja -palkkien valmistus	32
5.3	Jälkihoito ja lämmönseuranta	39
5.4	Lujuuskokeiden suunnittelu	40
5.5	Kokeiden suorittaminen	41

5.5.1	Rakenteesta poratut koekappaleet	41
5.5.2	Esivalmistettujen koekappaleiden puristuskokeet	45
5.5.3	Ultraäänen etenemisnopeuden mittaaminen ja ulosvetokokeet	45
6	Lujuuskoetuloksien yhdenmukaistaminen	47
6.1	Rakenteesta poratut koekappaleet	47
6.2	Esivalmistetut koekappaleet	49
6.3	Ultraäänen etenemisnopeudet ja ulosvetokokeiden tulokset	49
7	Tuloksien analyysi ja yhteenveto	57
7.1	Poranäytteiden tuloksien analyysi	58
7.2	Ultraääni, ulosvetokoe ja niistä saatujen tuloksien luotettavuus	61
7.3	Aiheita jatkotutkimuksille	63
7.3.1	Paras epäsuora koemenetelmä ja paras vastaavuus	63
7.3.2	Ulosvetokokeen luotettavuustutkimus	64
7.4	Johtopäätökset	65
7.5	Loppusana	67
	Lähteet	69
	Liitteet	
	Liite 1. Lämmönmittausloggerin säätäminen testo-ohjelmassa	
	Liite 2. Koepalkkien lämmönkehityskäyrät	

## Lyhenteet ja käsitteet

GOST	IVY (Itsenäisten valtioiden yhteisö) -maissa käytettävät standardit. Rakentamisessa vastaavat Suomessa käytettäviä SFS-EN-standardeja.
Lujuus	Tässä raportissa – betonin puristuslujuus 28 vuorokauden iässä, jollei toisin tarkenneta.
$\bar{X}$	Useammasta X:n arvosta lasketun keskiarvon matemaattinen merkintä.

## 1 Johdanto

Betoni on erittäin laajasti käytetty rakennusmateriaali, ja sen tärkein ominaisuus on puristuslujuus. Rakentamisen laadunvalvontaan kuuluu sen luonnollisena osana betonin vaatimustenmukaisuuden osoittaminen. Eri maissa betonin toteutuneen puristuslujuuden arvioinnille on olemassa eri vaatimuksia ja standardeja, ja lujuudenmäärittämis menetelmätkin poikkeavat toisistaan valtioittain niin detaljeissa kuin isommissakin linjauksissa.

Venäjä on perinyt monia standardeja Neuvostoliiton ajoilta, tosin vuosien aikana tapahtunut kehitys on mahdollistanut nykyajan Venäjän standardien ja normien rinnastamista eurooppalaisiin normeihin. Joissakin asioissa Venäjä on edennyt myös nopeammin kuin muut maat: esimerkiksi betonin lujuuden määrittäminen ultraäänen etenemisnopeuteen perustuen on Venäjällä osoittautunut toimivaksi ja suosituksi betonin lujuudenmäärittämis menetelmäksi, kun Suomessa kyseinen menetelmä on vasta keräämässä suosiotaan.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin, minkälaisia tuloseroja syntyy betonin määritettyyn puristuslujuuteen, kun sen määrittämiseen käytettiin eri koemenetelmiä. Sekä eurooppalaisten että venäläisten standardien mukaan betonin puristuslujuutta voidaan tarkastella 150 mm -mittaisten kuutioiden koetuloksiin perustuen, jolloin puhutaan betonin kuutiolujuudesta. Puristuslujuusarviointia voidaan tehdä myös muita koekappaleiden kokoja ja muotoja käyttäen, minkä jälkeen kyseisten kappaleiden ominaispuristuslujuus muunnetaan vastaamaan kuutiolujuutta. Muuntamiseen tarkoitetut koekappaleiden muuntokertoimet kuitenkin poikkeavat toisistaan venäläisissä ja eurooppalaisissa normeissa, ja tässä opinnäytetyössä käsiteltiin betonin puristuslujuutta vain Venäjän normien mukaan. Euroopassa käytettäviin standardeihin viitattiin, kun venäläisten ja eurooppalaisten standardien ero oli huomion arvoista. Monet standardiasiat päätettiin jättää tutkimuksesta pois ja toimia vain niiden standardien mukaan, joiden käyttö oli tutkimuksessa välttämätöntä.

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä betonitehtaan kanssa. Betonitehdas toimii Pietarissa ja se on yksi suomalaisyritysten Rudus Oy:n ja LujaBetoni Oy:n yhteisomistaman yrityksen Lujabetomix LLC:n kuudesta tehtaasta. Tavoitteena oli selvittää, minkälaisia eroja esiintyy betonin puristuslujuuskoetuloksissa, kun puristuslujuuden määrittämiseen

käytetään eri menetelmiä. Sitä varten tehtaalla suoritettiin betonin lujuuskokeita tavanomaisten tehtaan laadunvalvontamenetelmien lisäksi myös työmailla käytettävillä koe-menetelmillä.

Tutkimuksessa rajoituttiin käsittelemään asioita nimenomaan betonitehtaan näkökulmasta ja betonitehtaan suorittaman laadunvalvonnan kautta. Lisäksi tutkimuksessa ei käsitelty erikoisbetoneita kuten esimerkiksi kevytsorabetoneita, vaan testattiin kahta hyvin laajasti asunto- ja toimitilarakentamisessa käytettyä betonia.

## **2 Betoni rakennusmateriaalina**

Tänä päivänä hyvin harva rakennus tai rakennelma tuotetaan täysin ilman betonia, joka tunnetaan myös tekokivenä. Betonia käytetään niin asuin- että teollisuus- ja infrarakentamisessa, ja sen laaja käyttö koko maailmassa perustuu betonin erinomaisiin ominaisuuksiin. Kunkin projektin vaatimia betonin ominaisuuksia saadaan aikaan erilaisilla betoniresepteillä, joita kehitetään jatkuvasti ja joista saatavia betoneita testataan aina ennen reseptien käyttöä betonimassan valmistukseen rakentamista varten. Sen lisäksi, että betonia käytetään rakentamisessa paikalla valaen eli siirtämällä betonia työmaalla betoniautosta muotteihin, betonirakentamista ovat myös elementeistä koottavat rakennukset. Niin sanottuja tyyppikohteita, joista yleisin esimerkki ovat joka puolella maailmaa suositut asuinkerrostalot, voidaan rakentaa nopeammin käyttämällä valmiita betonielementtejä. Lisäksi betonielementtirakentaminen vähentää laaturiskejä itse rakenteissa, sillä betonielementtejä toimittavilla tehtailla on aina olemassa yksityiskohtaisia laadunvalvontakäytäntöjä. Vaativimmat projektit, joihin ei voida valmistaa elementtejä etukäteen tehtaalla, toteutetaan paikallavaluna. Betonista saa rakennettua hyvin erilaisia muotoja ja melkein loputtoman suuria rakenteita, ja arkkitehdin rajoituksina toimivat vain fysiikan lait.

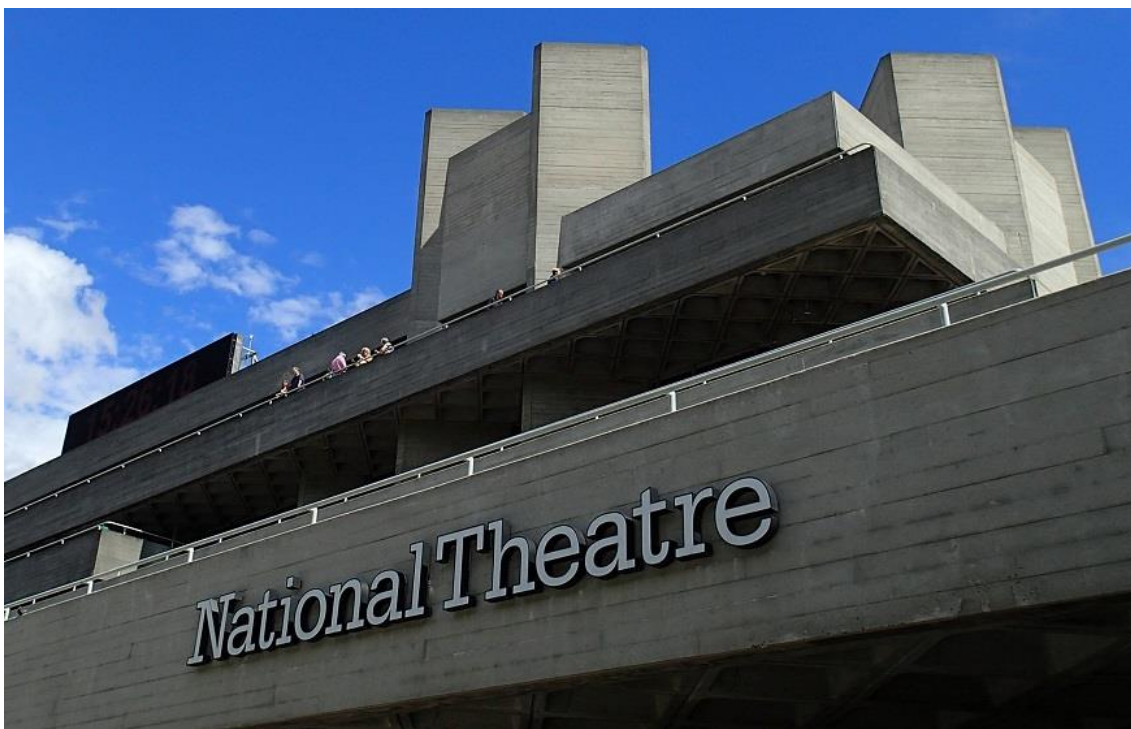
Betoni ei kuitenkaan ole helppo rakennusmateriaali, ja siihen liittyy paljon haasteita. Maailmassa ei ole olemassa ainutta kaikkialla hyväksyttyä ”oikeaa” betonin reseptiä, sillä joka projektiin tarvitaan erilaisia betoneita ja niiden ominaisuuksia. Näihin ominaisuuksiin vaikutetaan betonin valmistuksessa laskemalla ja testaamalla betonin osainneiden sekä lisäaineiden määriä niin, että kehitetty betonimassa muuttuu kovetettuun projektin vaatimukset täyttäväksi rakennebetoniksi. Betonin tuotantoa kehitetään



jatkuvasti, ja kehityksellä saadaan aikaan uusia mahdollisuuksia sekä arkkitehtitoiminnassa että teknisessä mielessä.

Betonirakentamisessa tehdas ei kuitenkaan pysty koskaan yksin takaamaan sitä, että kyseisen tehtaan toimittamasta betonimassasta valettu rakenne tulee vastaamaan kaikkia sille asetettuja vaatimuksia: erittäin paljon riippuu myös työmaatuotannosta ja työmaalla tapahtuvasta betonin käsittelystä. Kun betonikuorma saapuu työmaalle ja betonimassasta valetaan koekappaleita sekä tarkistetaan tarvittaessa myös betonin notkeus, jatko riippuu työmaan toiminnoista. Joillakin työmailla on nähty sitä, että betoniin lisättiin vettä nostaakseen betonin notkeutta eli helpottaakseen valu- ja tiivistystyötä, minkä seurauksena betonin lujuus laskee; huono betonin tiivistäminen, kun valutöihin osallistuu täysin kokemattomia rakennusmiehiä, vaikuttaa niin rakenteen ulkonäköön kuin myös sen loppulujuuteen, ja esimerkiksi pintavaatimukset saattavat jäädä täyttymättä sen takia, että rakennustyömaan työntekijät eivät ole puhdistaneet muotteja ennen valua – tai muotit tehtiin vanhoista ja liian kuluneista vanereista. Betonirakenteille asetettavat pintavaatimukset ja niiden täytyminen ovat siis työmaan vastuulla, eikä tehdas pysty vaikuttamaan työmaalla tapahtuviin toimintoihin kovinkaan paljon. Työmaa puolestaan pystyy vaikuttamaan betonirakenteen ominaisuuksiin hyvin paljon.

Kaikista betoniin liittyvistä haasteista huolimatta, betoni on yksi suosituimpia rakennusmateriaaleja. Arkkitehdit voivat määrätä jopa sen, että betonirakenne olisi tietyn väristä ilman mitään muita rakenteen jälkikäsittelyjä, pelkällä pölynestokäsittelyllä: betonia voidaan värjätä tehtaalla. Muoteilla saa myös hyvin erilaisia betonipintoja aikaan: esimerkiksi Kampin metroaseman liukuportaiden yläpuolella olevat betonipinnat ovat tarkkaan suunnitellun laudoitustyön tulosta. Tavallisesta sahatarvarasta rakennettiin myös Lontoon Kansallisteatterin näkyviin jäävien betonirakenteiden muotit. Lopputuloksena syntyi hieno ja moderni rakennus (kuva 1). Hiomalla kovettunutta betonia voidaan saada näkyviin sen osa-aineet niin, että hiottu pinta muistuttaa värikästä graniittia. Mahdollisuuksia on monenlaisia, ja hyvin toteutettuina betonirakenteiden suunnitelmat muuttuvat monen kaupungin ylpeydeksi.



Kuva 1. Lontoon Kansallisteatterin betonirakenteita: muotteihin käytettiin tavallista sahatava-  
raa.

Betonia ja sen periaatteella kehitettyjä tuotteita käytetään muihinkin tarkoituksiin kuin kantaviin rakenteisiin: betonista valetaan lattioita, jotka pintakäsittelyn jälkeen kestävät kovaa kulutusta; juotosbetonilla täytetään betonielementtien väliset saumat, ja ainakin Chillessä betonia käytetään erittäin paljon tierakentamisessa. Siellä betonista valettua tietä ei päällystetä asfaltilla, ja se palvelee yhteiskuntaa vuosikymmenien aikana lukuisista maanjäristyksistä huolimatta.

## 2.1 Betonin käytön historiaa

Betoni on hyvin nykyaikainen materiaali, mutta sen käytön juuret ulottuvat niinkin pitkälle kuin jopa Egyptin pyramideihin, joiden rakentamisessa sideaineena käytettiin poltettua kipsiä. Antiikin Kreikassa keksittiin lisätä vulkaanista tuhkaa poltettuun kalkkiin, mikä johti siihen, että jo näinä aikoina ihmisillä oli käytössään kovettuva materiaali: riitti, kun siihen lisättiin vettä, ja kovettumisreaktio lähti käyntiin. Tuon aikaista betonia käytettiin myös Rooman rakennustarpeisiin, mutta Rooman valtakunnan kaatuminen vei mukanaan myös betonitekniikan kehityksen ja progressi pysähtyi pitkäksi aikaa. [1, s. 18.]

Antiikin Roomassa käytetty betonin sideaine ei ollut kuitenkaan sitä, mitä tänä päivänä käytetään betonin valmistukseen. Melkein kaksi tuhatta vuotta sitten roomalaisten käytössä oli potsolaanisementti, jonka toimivuus perustui siihen, että kalkkilaastiin lisättiin siihen liukenevaa piihappoa, jota esiintyi riittävin määrin potsolaanimaassa, ja näin saatiin aikaan niin sanottu hydraulinen sideaine eli veden kanssa reagoidessaan kovettuva massa [2, s. 14].

Nykyaikana betonin valmistukseen käytetään sidenaineena portlandsementtiä. Portlandsementin isäksi sanotaan englantilaista muuraria Joseph Aspdinia, joka teki vuonna 1824 kemiallisen kokeen omassa keittiössään: hän sekoitti saven ja jauhetun kalkkikiven, minkä jälkeen kuumensi seoksen. Sen jälkeen hän jauhoi kuumennetun seoksen hienoksi jauheeksi ja loppujen lopuksi totesi, että kyseinen jauhe kovettuu, kun siihen lisätään vettä, eli vesi käynnistää kovettumisreaktion. Aspdin patentoi keksintönsä nimellä portlandsementti: saatu materiaali muistutti sekä väriltään että lujuudeltaan Portlandin kreivikunnasta saatavaa rakennuskiveä, joka oli tuon aikaisessa Englannissa suuressa arvossa. Tästä tapahtumasta alkoi sementtiteollisuuden kehitys, jonka aikana selvitettiin, mitkä asiat vaikuttavat sementin laatuun, tutkittiin vesisementtisuhteen vaikutusta betonin lujuuteen, havaittiin betonin tiivistämiseen liittyviä haasteita, siirryttiin äärimmäisyyksistä toisiin ja lopuksi päädyttiin siihen, että tänä päivänä koko maailmassa käytetään kiviaineksista, portlandsementistä ja vedestä valmistettavaa betonimassaa. [1, s.19; 2, s. 14-15.]

## 2.2 Betonin osa-aineet

Betonin pääosa-aineita ovat kiviainekset, sideaine ja vesi. Sideaineena eli kiviainesten välisenä liimana toimii sementti, joka kovettuu reagoidessaan veden kanssa ja jonka määrästä sekä vesisementtisuhteesta riippuu tulevan betonin lujuus. Tarvittujen betonin ominaisuuksien tavoittamiseen käytetään erilaisia eri osa-aineiden määriä, ja sopivien ainesmäärien säätämistä kutsutaan suhteitukseksi.

### 2.2.1 Sementti

Sementteille on olemassa omia standardeja eri maissa. Suomessa betonin valmistukseen käytettävien sementtien tulee täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset, mutta esimerkiksi naapurimaassa Venäjällä sementtivaatimukset löytyvät kyseisen maan

omista standardeissa. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että sementtien laatua valvotaan kaikkialla melko tarkkaan, ja standardien peruslinjaukset ovat hyvin pitkälle samanlaisia. Sementit ryhmitellään viiteen päälajiin, joita ovat CEM I – CEM V, ja luokittelu perustuu sementtien koostumukseen eli siihen, kuinka paljon ja mitä seosaineita sementti sisältää. Edellä mainitun standardin tuntemat sementin seosaineet ovat maasuunikuona, kalkkikivi, silika, pozzolaanit, lentotuhka ja poltettu liuske. Lisäksi samassa standardissa sementit jaotellaan niiden puristuslujuuden mukaan. Standardilujuus on sementtikiven saavuttama puristuslujuus sen ollessa 28 vuorokauden ikäinen. [1, s. 29-30.]

Betonin lujuus riippuu sekä siihen käytetyn sementin ominaisuuksista että sementin määrästä. Kuitenkin se ajatus, että kaikki betonin osa-aineet voitaisiin korvata pelkällä sementillä ja vedellä, ei johda haluttuihin tuloksiin: veden kanssa reagoiva ja kovettuva sementti kutistuu merkittävästi, ja sementtiliimaa tulee siis käyttää betonissa pelkkänä sideaineena kutistumattomien kiviainesten yhdistäjänä. Lisäksi sementti on betonin kallein osa-aine, ja tästä syntyy taloudellisesti looginen idea: korkeamman lujuusluokan betoni on aina myös kalliimpaa, koska siihen käytetään joko enemmän tai korkeampaa lujuusluokkaa olevaa sementtiä.

Tärkeä asia, joka myös vaikuttaa betonin lujuuteen, on vesisementtisuhde. Liian pieni veden määrä johtaa siihen, että osa betonissa olevassa sementissä ei reagoi veden kanssa eli hydrataatiota ei tapahdu koko sementtimäärän kanssa. Reagoimatta jäänyt sementti ei toimi sideaineena, ja lisäksi liian vähäinen veden määrä betonissa tekee betonimassan tiivistämisen hankalaksi. Toisaalta, liiallinen veden määrä johtaa siihen, että vettä jää reagoimatta, jolloin kovettuneeseen sementtikiveen muodostuu vedellä täytettyjä ja betonin lujuutta heikentäviä huokosia [2, s. 35]. Sopiva sementin ja veden määrä sekä vesisementtisuhde ovat siis merkittäviä betonin lujuuden tekijöitä.

### 2.2.2 Kiviainekset

Betonimassan valmistukseen käytetään erilaisia kiviaineita, joille on myös olemassa standardien asettamia vaatimuksia. Kiviainestuotteet jaotellaan niiden raekoon mukaisesti neljään luokkaan seuraavasti, joita ovat:

- Filleri eli fillerikiviaines, joka läpäisee 0,063 mm:n seulan
- Hieno kiviaines, yleensä hiekka

- Luonnon lajittama 0/8
- Karkea kiviaines.

Kyseinen jaottelu noudattaa Suomessa käytettäviä standardeja ja ohjeita [3, s. 12-14]. Venäjällä betonin valmistus poikkeaa suomalaisesta jo sillä, että Venäjän standardien mukaiset seulat ovat 5, 10 ja 20 millimetriä, kun Suomen standardeissa seulakoot ovat 4, 8, 16 ja 32 millimetriä. Näin ollen, kun Suomessa tilattavan betonin maksimiraekooksi ilmoitetaan esimerkiksi 16 millimetriä, Venäjällä vastaavassa rakenteessa tullaan käyttämään 20 millimetrin maksimiraekokoa.

Kiviainesten ominaisuudet eivät rajoitu pelkästään raekokoon, vaan vaatimusten mukaan kiviainesten laadunvalvonta käsittää myös niiden radioaktiivisuuden, puhtauden, raemuodon, absorption sekä mainittujen lisäksi lukuisia muita kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin edellytetään, että betonitehtailla käytetään aina tehtaan sijaintivaltion standardien vaatimusten mukaisia kiviaineeksiä.

### 2.2.3 Vesi

Myös betonin valmistukseen käytettävälle vedelle on olemassa standardien mukaisia laatuvaatimuksia. Suomessa betonin valmistukseen käytettävän veden on täytettävä standardin SFS-EN 1008 vaatimukset, mutta erittäin karkeana nyrkkisääntönä voidaan pitää seuraavaa: vesi soveltuu betonin valmistukseen, jos se ei haise eikä maistu pahalta ja näyttää puhtaalta [1, s. 59]. Tämä ei kuitenkaan päde kaikkialla: Suomessa tavallinen vesijohtoverkosta tuleva vesi täyttää tällaisen nyrkkisäännön vaatimukset, mutta esimerkiksi Venäjällä vesijohtoverkosta tulevan veden laatu riippuu hyvin paljon siitä, millä seudulla ollaan, koska eri seuduilla veden kloridipitoisuus saattaa vaihdella merkittävästi. Kloridipitoisuus onkin jo kriittinen tekijä betonin valmistukseen käytettävän veden laadussa, ja sen raja-arvot riippuvat siitä, mikä on valmistettavan betonin loppukäyttö. Näin SFS-EN 1008 -standardin mukaan jännitettävän betonin tai injektointilaastin valmistukseen käytettävän veden kloridipitoisuus saa olla enintään 500 milligrammaa litraa kohti, kun taas raudoittamattomiin rakenteisiin voidaan valmistaa betonia sellaisen veden kanssa, jonka kloridipitoisuus on alle 4500 mg/l. [4, s. 29.] Kaikkeen edellä sanottuun perustuen, betonin raaka-aineeksi eivät sovi viemäriverdet, merivedet, teollisuuden jätevedet tai luonnon pintavedet, jos niiden soveltuvuutta ei osoiteta riittävin kemiallisin analyysin.

#### 2.2.4 Lisäaineet

Veden, kiviainesten ja sementin lisäksi betonin valmistukseen voidaan käyttää erilaisia lisäaineita. Lisäaineilla saadaan aikaan haluttuja muutoksia sekä betonimassaan että kovettuneeseen betoniin. Betonimassan työstettävyyttä voidaan helpottaa notkistimilla, tosin niilläkin on olemassa tiettyjä sivuvaikutuksia notkistimesta riippuen. Valmiin betonirakenteen pakkasenkestävyyteen tarvitaan puolestaan suojahuokosia, jotta kapillaarihuokosiin jäänyt vesi pääsee jäätyessään laajentumaan rikkomatta ympäröivän betonin sidoksia ja aiheuttamatta ylipainetta ympärilleen. Näitä huokosia saadaan aikaan huokostimilla. Muita lisäaineita ovat muun muassa kiihdyttimet, hidastimet, vedenimeytymistä estävät lisäaineet, paisuttavat tai kutistumista estävät aineet [1, s. 61]. Betonitekniikan kehittyessä markkinoille on tullut jatkuvasti uusia lisäaineita, joilla betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksia voidaan säätää täyttämään niille asetettuja vaatimuksia.

### 2.3 Betonin ominaisuudet

Tässä luvussa ei tulla käsittelemään betonimassan ominaisuuksia, vaan keskitytään ainoastaan kovettuneen betonin tärkeimpiin ominaisuuksiin. Vaatimukset, jotka kovettuneen betonin tulee täyttää, määräytyvät jo suunnitteluvaiheessa: sekä käyttöikä- että rakennesuunnittelussa [5, s. 37]. Lopullinen rakenteeseen käytettävän betonin valinta riippuu siis useasta tekijästä kuten rakenteen suunnittelusta käyttöikästä, kuormista, ympäristön olosuhteista, mahdollisista kemiallisista rasituksista, vaadittavasta betonin vedenpitävyydestä, rakenteen massiivisuudesta, pintojen tulevasta kulutuksesta ja niin edelleen.

#### 2.3.1 Puristuslujuus

Kovettuneen betonin tärkein rakennetekninen ominaisuus on sen puristuslujuus eli sen kyky kestää puristusrasituksia. Betonin vetolujuus on sen puristuslujuuteen nähden hyvin alhainen: noin 5-8 % betonin puristuslujuudesta; lisäksi, mitä suurempi on betonin puristuslujuus, sitä pienempi on saman betonin vetolujuuden prosenttiosuus sen puristuslujuudesta [1, s. 84]. Vetolujuuden merkitys on kuitenkin tavanomaisissa betonirakenteissa hyvin vähäinen, sillä rakenteeseen kohdistuvat vetorasitukset hoidetaan raudoituksella: teräksen vetolujuus on erittäin korkea, ja lisäksi teräksen ja betonin

lämpölaajeneminen on samaa luokkaa, joten nämä kaksi materiaalia toimivat erittäin hyvin yhdessä. Emäksinen betoni suojaa rautoja myös ruostumiselta, joten betonin ja teräksen yhdistelmä on todella hyvä myös kemiallisessa merkityksessä.

Betonin puristuslujuus on se puristusrasitus, jonka betoni kestää 28 vuorokauden iässä eli sillä hetkellä, jonka jälkeen betonin lujuuden kehittyminen ei ole enää merkittävää tai ratkaisevaa. Rakenteiden suunnittelussa otetaankin huomioon se, että betoni saavuttaa vaaditun lujuuden vasta näin pitkän ajan kuluttua. Jos rakenteita on kuormitettava lopullisilla kuormilla jo aikaisemmin, työmaan henkilöstö voi sopia suunnittelijan kanssa korkeamman lujuusluokan betonin käytöstä, jotta rakenteen betoni saavuttaa vaaditun puristuslujuuden jo varhaisemmassa vaiheessa. Merkittävin betonin lujuudenkehitykseen vaikuttava tekijä on ympäristön lämpötila. Työmaiden henkilöstö pitääkin usein nyrkkisääntönä sitä, että kymmenen celsiusasteen lämpötilan lasku tekee betonin lujuudenkehityksen kaksi kertaa hitaammaksi. Betonin lujuudenkehitystä voidaan ennakoita seuraamalla rakenteen sisällä olevaa lämpötilaa valun yhteydessä asennettujen antureiden avulla: sementin hydrataatio on eksotermisen reaktio eli se vapauttaa lämpöä, ja hydrataatioreaktion eteneminen on siis suoraan verrannollinen betonin lujuudenkehitykseen.

Betonin lujuusluokat Suomessa ovat C8/10...C100/115, missä ensimmäinen luku ilmoittaa lieriölujuuden ja jälkimmäinen kuutiolujuuden. Lieriölujuus on se rasitus, jonka 150 mm halkaisijaltaan ja 300 mm pituudeltaan oleva lieriön muotoinen koekappale on puristuskokeessa kestänyt. Kuutiolujuus on vastaavasti se rasitus, jonka 150 mm sivumitaltaan oleva kuution muotoinen koekappale on pystynyt kestämiään. Rasituksen yksikkö on MN/m<sup>2</sup> eli MPa. [1, s. 85.] Yleisimmin käytettyjä betonin lujuusluokkia ovat C20/25...C50/60, ja näitä Suomessa käytettyjä lujuusluokkia vastaavat Venäjän standardien mukaiset lujuusluokat ovat B25...B60. Venäläisten standardien mukaisessa betonin lujuusluokan merkinnässä esiintyvä luku tarkoittaa sitä, että 95 % koekuutioista tulee kestämiään kyseisen puristusrasituksen. Betonin lujuuden osoittamiseen perehdytään enemmän luvussa 3.

### 2.3.2 Pakkasenkestävyys

Betonitoissa on oltava tarkkana siitä, että betoni ei pääse jäätymään ennen kuin se saavuttaa jäätymislujuuden. Alhaisissa lämpötiloissa valaessa käytetään lämmitystä. Se, että betoni on saavuttanut jäätymislujuuden ja sen jälkeen lujuus on päässyt kehit-



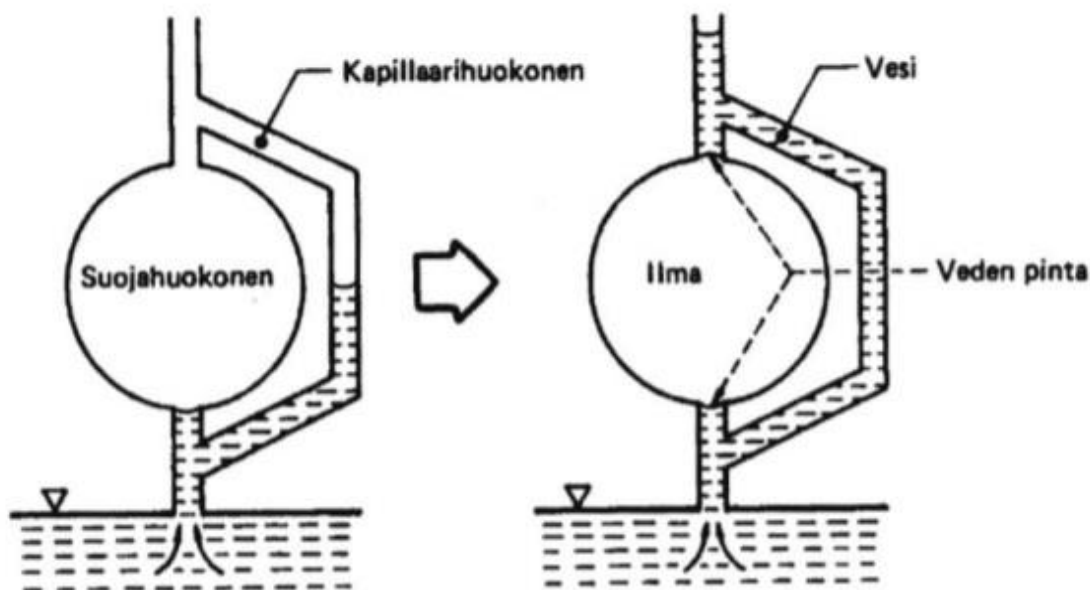
tymään normaalisti, ei kuitenkaan vielä takaa sitä, että lopullisesta betonirakenteesta tulee pakkasenkestävä. Rakenteiden on oltava pakkasenkestäviä silloin, kun ne altistuvat jäätymiselle niiden käyttöiän aikana, ja tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi kylmät monikerrokset pysäköintitalot, sillat ja muut ulkona sijaitsevat rakenteet.

Tavallinen betoni, jonka pakkasenkestävyyttä ei ole suunniteltu etukäteen, voi vaurioitua kylmissä olosuhteissa merkittävästi. Tyypillisiä pakkasen aiheuttamia ongelmia ovat betonin lujuuden menetys, vedenpitävyyden pieneneminen, halkeilu ja lohkeaminen. Nämä vauriot saavat alkunsa silloin, kun betonin kapillaarihuokosissa oleva vesi laajenee jäätyessään noin yhdeksän tilavuusprosenttia. Jäätymislaajentumisen seurauksena rakenteen huokosverkostoon muodostuu ylipainetta, joka rikkoo sementtikiven kiteitä. Myös se, että vesi ei saa riittävästi tilaa laajentuakseen, aiheuttaa betoniin pakkasvaurioita. [1, s. 116.]

Yleisenä käytäntönä voidaan pitää sitä, että alhainen vesisementtisuhte betonissa lisää betonin pakkasenkestävyyttä, koska silloin kapillaarihuokosia syntyy vähemmän kuin korkeamman vesisementtisuhteen betoneihin. Alhaista vesisementtisuhdetta ei kuitenkaan ole aina mahdollista käyttää, ja tavanomaiset betonit, jotka eivät kuulu korkealujuusbetoneihin, vaurioituvat pakkasessa erittäin suurella todennäköisyydellä edellä mainituista syistä johtuen.

Sitä varten, että betonirakenteesta saataisiin pakkasenkestävä, täytyy siis antaa jäätyvälle vedelle tilaa jäätyä ja toisaalta muodostaa betoniin sellaisia huokosia, jotka vähentävät ylipainetta. Näitä huokosia kutsutaan suojahuokosiksi, joiden halkaisija on 0,01...0,05 mm. Suojahuokosten toiminta perustuu siihen, että niitä esiintyy riittävästi kapillaarihuokosverkostossa, joka täyttyy vedellä. Veden pintajännitysilmio ei kuitenkaan anna veden tunkeutua näihin suojahuokosiin, joten ne pysyvät aina ilmatäytteisinä (kuva 2). Kun vesi jäätyessään laajenee ja rakenteen huokosverkostoon muodostuu ylipainetta, suojahuokokset toimivat ylipaineen tasapainottajana. Hyvin pelkistettynä, ylipaine kohdistuu siis näihin suojahuokosiin eikä rakenteeseen.





Kuva 2. Suojahuukosten toimintaperiaate. Suojahuukokset pysyvät ilmatäytteisinä silloinkin, kun niitä ympäröivät kapillaarihuukokset täyttyvät vedellä. Veden pintajännitykset eivät anna veden tunkeutua suojahuukosiin. [1, s. 118]

Suomessa betonin vaadittu pakkasenkestävyys ilmenee suunnittelijan merkitsemästä betonin rasitusluokasta. Suomessa käytetään seuraavia rasitusluokkia:

- X0: ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä
- XC: karbonatisoitumisen aiheuttama teräskorroosio
- XD ja XS: kloridien aiheuttama teräskorroosio
- XF: jäätymis-sulamisrasitus
- XA: kemiallinen rasitus.

Kuten tästä ilmenee, betonin vaaditun pakkasenkestävyyden määrää rasitusluokka XF. Tällä rasitusluokalla on alaluokkia, jotka merkitään XF1...XF4 (taulukko 1) rakenteen kohdistuvasta rasituksen intensiivisyydestä ja sen luonteesta riippuen. Tässä kappaleessa keskitytään kuitenkin vain rasitusluokkiin XF1 ja XF3 eli sellaisiin, joihin ei kuulu jäänsulatusaineiden aiheuttamia rasituksia. Betonin valmistajat valvovat betoniresepteillään tuotetun betonin pakkasenkestävyyttä ennakkokokein, jatkuvalla laadunvalvonnalla ja tasokokeilla. Ennakkokokeilla tutkitaan, täyttääkö kehitetty betoniresepti kovettuneelle betonille asetettavat vaatimukset; jatkuvalla laadunvalvonnalla varmistetaan tuotantoprosessin kulku ja vältetään haitallisten muutosten syntymistä betonimassoihin; tasokokeilla seurataan sitä, että tehtaan valmistamien betonien laatu olisi tasaista [4, s. 155].

Taulukko 1. XF-rasitusluokkien kuvaukset [5, s. 22].

Rasitusluokka, määritelmä	Tyypilliset rakenteet
<b>XF1:</b> Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Jäätymiselle alttiit rakenteet, jotka kastuttuaan myös kuivuvat kohtuullisen nopeasti. Tällaisia ovat tyypillisesti sateelle alttiit pystysuorat betonipinnat.  Tyypillisiä rakenteita ovat julkisivut, sokkelit, Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten kansilaatta, palkit, maa- ja välituet.
<b>XF2:</b> Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Rakenteet, joiden kastuminen ja kuivuminen on samanlaista kuin rasitusluokassa XF1, mutta ne ovat lisäksi alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille.  Tyypillisiä rakenteita ovat meluseinät ja sokkelit tien vieressä sekä suolattavien teiden siltojen osat kuten päällysrakenteen palkit ja kansilaatat, maa- ja välituet.
<b>XF3:</b> Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Rakenteet, joiden vedellä kyllästyminen saattaa jäätymässään olla korkea. Tällaisia ovat tyypillisesti sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat. Ulkona olevat vaakasuorien rakenteiden alapinnat saattavat myös kuulua tähän luokkaan.  Tyypillisiä rakenteita ovat parvekkeet, siltapilarit ja muut rakenteet sisävesien vesirajassa, patorakenteet, makean veden altaat. Samoin suolaamattomien teiden siltojen osat kuten reunapalkit, siirtymälaatat, pilari-maiset välituet, rengaskehäsiltojen peruslaatat ja vesistösiltojen suojaamattomat vedenvaihtelualueen rakenteet.
<b>XF4:</b> Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Kosteusolosuhteiltaan XF3:a vastaavat rakenteet, mutta lisäksi betonia rasittavat suorat jäänsulatusaineroiskeet.  Tyypillisiä rakenteita ovat ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat ja jäänsulatusaineille alttiit teiden siltojen kannet.

Kuten edellä selostetuista asioista ilmenee, betonin pakkasenkestävyys riippuu betonin vesisementtisuhteesta ja ilmamäärästä. Alhainen vesisementtisuhte parantaa betonin pakkasenkestävyyttä, mutta saa betonin myös lujemmaksi ja sen kautta kalliimmaksi. Kun kyse on tavanomaisesta asuinrakentamisesta, jossa ei yleensä käytetä korkeita betonin lujuuksia, pakkasenkestävyys saavutetaan järjestämällä betoniin suojahuokosia eli huokostamalla. Suomessa pakkasenkestäville betoneille on käytössä XF1- ja XF3-rasitusluokan asteiden vaatimuksia vastaava F-luku, joka lasketaan kaavasta

$$F = \frac{1}{\max\left\{0,25 ; 7,2 \frac{(v/s)^{0,45}}{(a-1)^{0,14}} - 4,0\right\}},$$

jossa

v/s	on tehollinen vesisementtisuhte
a	on betonin ilmamäärä prosenttiyksikköinä

Tämä kaava pätee sellaisenaan, kun tarkasteltavan betonin kiviaineksen ylänimellisraja on 16 mm; kun maksimiraekoko on 12 mm, a-lukua tulee pienentää 0,5 prosenttiyksiköllä, ja kun käytettävä maksimiraekoko on 8 mm, a-lukua pienennetään 1,0 prosenttiyksikön verran [5, s. 83]. Kaavasta ilmenee, että betonin ilmamäärää lisäämällä voidaan suurentaa vesisementtisuhdetta, kunhan kovetuttuaan tällainen betoni täyttää sille asetetut lujuusvaatimukset.

Kun asiaa ajatellaan tehtaan näkökulmasta taloudellisesti kannattavalla tavalla, toimenpidejärjestys on seuraava:

1. Tarkistetaan betoninormeista, mihin F-lukuun on päästävä betonin rasitusluokan mukaan.
2. Katsotaan betoninormeista kyseisen rasitusluokan betoneilta vaadittava vähimmäisilmamäärä. Se vaihtelee betonin maksimiraekoosta ja rakenteen suunnittelusta käyttöiästä riippuen.
3. Valitaan ilmamäärävaatimukset ja lujuusvaatimukset täyttävän betonin resepti tehtaan reseptitietokannasta.
4. Edellä esitettyyn kaavaan sijoitetaan valitun reseptin tiedot: vesisementtisuhte ja ilmamäärä. Lasketaan F.
5. Jos valitun betonin F-luku ei ole riittävä täyttämään rasitusluokan vaatimukset, valitaan toinen resepti: joko pienemmällä vesisementtisuhteella tai suuremmalla ilmamäärällä. Pienemmän vesisementtisuhteen betonit ovat kalliimpia, joten useimmiten lähdetään nostamaan valitun betonin ilmamäärää.

Tämä on hyvin pelkistetty versio siitä, miten tehtailla varmistetaan betonien pakkasenkestävyys. Tänä päivänä tavanomaisiin valuihin toimitettavien betonien pakkasenkestävyys on jo yleensä tiedossa: säännölliset tasokokeet ja jatkuva laadunvalvonta tehtaalla varmistavat reseptien toimivuuden. Lisäksi reseptien suunnitteluun on olemassa tietokoneohjelmia, joiden avulla kehitetään tietyt vaatimukset täyttävät betonit.

Rasitusluokkien XF2 ja XF4 kanssa käytetään P-lukumenettelyä, joka liittyy jo enemmän tie- ja siltarakentamiseen ja johon ei tässä opinnäytetyössä perehdytä.

Venäjällä betonin pakkasenkestävyys merkitään eri tavalla: kun betonirakenteeseen ei tule kohdistumaan jäänsulatusaineiden kloridien aiheuttamia rasituksia, puhutaan luvusta  $F_1$ , ja kun kyse on rakenteen tulevasta vuorovaikutuksesta jäänsulatusaineiden kanssa, käytetään lukua  $F_2$ . Tavanomaisessa talorakentamisessa alaindeksiä ei yleensä merkitä ja tehtaalle ilmoitetaan vain vaadittu betonin pakkasenkestävyysluokka, esimerkiksi F200. Pakkasenkestävyysluokkia löytyy Venäjän normeista väliltä F50...F1000, missä luku kertoo, kuinka monta jäätymis-sulamissyksyä betonin on kestävä menettämättä lujuuttaan yli sallittujen rajojen [6].

### 2.3.3 Vesitiiveys

Tietyissä rakenteissa betonille voidaan asettaa vesitiiveysvaatimuksia. On luonnollista, että rakenteeseen käytetyn betonin vesitiiveys ei missään nimessä yksin takaa koko rakenteen vesitiiveyttä: rakenteen mahdollisiin saumoihin on käytettävä erilaisia veden kulkua estäviä rakennusosia, ja valun aikana tapahtuvan tiivistämisen on oltava kunnollista. Betonirakenteiden vesitiiveys voidaan saavuttaa myös pinnoittamalla betonirakenteet siihen kehitetyillä materiaaleilla tai, jos rakenteen muoto sen sallii, hoitamalla koko rakenteen valu yhdellä kerralla eli välttymällä työsaumoilta kokonaan.

Itse betonin vesitiiveys on tärkeä ominaisuus monessa rakenteessa. Betoni on itseltään hyvin vesitiivis materiaali edellyttäen, että valun yhteydessä on toimittu sääntöjen mukaisesti eli betoni on hyvin tiivistetty ja jälkihoidettu. Suomessa betonin vesitiiveys todetaan standardin SFS-EN 12390-8 mukaisesti. Kyseinen standardi määrittelee, kuinka betonin vesitiiveyskokeet tulee suorittaa, ja näiden kokeiden pohjalta betoni joko todetaan riittävän vesitiiviiksi suunnittelijan asettamien vesitiiveysvaatimusten mukaan tai siirrytään käyttämään toista betonireseptiä. Kokeen ajaksi kovettuneen betonin pintaan kohdistetaan 0,5 MPa:n paine 72 tunnin ajaksi, minkä jälkeen koekappale halkais-

taan. Halkaisupinnasta mitataan veden tunkeumasyyvyys millimetreinä. Kun mitattu luku jää alle 100 mm, betonia pidetään vesitiiviinä [4, s. 97]. Suunnittelija voi asettaa betonille myös tiukempia vaatimuksia, mutta silloin kyse on jo erikoistapauksista. Yleensä betonin vesitiiveys ei muodostu ongelmaksi: mitä pienempi on betonin vesisementtisuhde, sitä paremmin betoni pitää vettä. Vesitiiveysvaatimuksia esitetäänkin yleensä sellaisille rakenteille, joille esitetään myös suhteellisen kovia lujuusvaatimuksia. Käytännössä vesitiiveyskokeilla vain osoitetaan ja todetaan betonin vesitiiveys eikä selvitetä, täyttääkö betoni sille asetetut vesitiiveysvaatimukset vai ei. Nyrkkisääntönä voidaan pitää seuraavaa: mitä suurempi on betonin puristuslujuus, sitä paremmin se pitää vettä.

Venäjällä on puolestaan käytössä tarkka asteikko, jonka mukaan betonin vesitiiveys määritellään. Venäjän standardien mukaan betonin vesitiiveys voidaan selvittää kolmella eri tavalla: niin sanotulla ”märkätäplätestillä”, suodatuskertoimen kautta ja veden tunkeumasyyvyyden kautta. Jälkimmäiseksi mainittu menetelmä on täysin samanlainen kuin se, jota käytetään Suomessa SFS EN-12390-8 -standardin mukaan. Taulukosta 2 ilmenee, mikä Venäjän standardien mukainen betonin vesitiiveys vastaa mitään vesitunkeumalukemaa; taulukosta on jätetty pois muiden menetelmien vastaavat tulokset siitä syystä, että niitä ei pystytä suoraan rinnastamaan Suomessa käytössä olevaan standardiin.

Taulukko 2. Venäjän standardin ja Suomessa käytettävän SFS-EN-standardin mukainen betonien vedenläpäisevyysluokittelu [7, liite A, käännetty ja täydennetty].

	Betonin vedenläpäisevyys					
Veden tunkeumasyyvyys, mm	>150	>150	60-150	35-60	20-35	<20
Betonin vesitiiveysluokka	W2	W4	W6	W8	W10- W14	W16- W20
Venäjän standardi GOST 12730.5-2018	Normaali		Normaalia alhaisempi	Alhainen	Erittäin alhainen	
Suomessa käytettävä standardi SFS EN-12390-8	Vettä läpäisevä			Vettä läpäisemätön		

Kuten taulukosta ilmenee, Venäjän standardit käsittävät myös erittäin vesitiiviitä betoneita. Pietarissa monessa asuinkerrostalokohteessa perustusten ja pohjakerrosten rakentamiseen käytetäänkin vesitiiveydeltään parempaa betonia kuin maanpinnan yläpuolelle nouseviin rakenteisiin: soinen maaperä ja runsaat pohjavedet ovat olleet kau-

pungin haasteena sen perustamishetkestä lähtien, ja syvät kellarivuodot ovat siellä tyypillisiä monelle vanhalle rakennukselle. Sekä rakenteille että niihin käytettäville betoneille asetetut vesitiiveysvaatimukset pienentävät vesivuotojen tapahtumistodennäköisyyttä maanalaisissa rakenteissa. Paikallisilla markkinoilla laaturakentajina tunnetut rakennuttajat saattavat vaatia kellarirakenteisiin betonia, jonka vesitiiveysluokka on W16. Tällaisissa tapauksissa betonin alhainen vesisementtisuhde ei aina välttämättä riitä yksin takaamaan haluttua vesitiiveyttä, vaan tehdas joutuu kehittämään ja ennakotestaamaan asiakkailleen uusia erittäin vesitiiviiden, mutta keskilujien betonien reseptejä.

#### 2.3.4 Muut tärkeät ominaisuudet

Suunnittelijoiden täytyy ottaa huomioon lukuisia asioita betonirakenteita suunnitellessaan. Tuleviin betonirakenteisiin kohdistuvat kemialliset rasitukset, kova kulutus, käytöikä, haluttu betonin kovettumisnopeus, betonimassan työstettävyys, kutistuma ja jopa muottipintavaatimukset saattavat muodostua tehtaan ongelmaksi, kun työmaalla valitaan betonin olevan esimerkiksi liian karkea, kun betonipintoja ei viimeistellä, tai liian hitaasti kovettuva, mikä on erittäin tärkeää, kun kyse on jälkijännitetyistä rakenteista. Betonin valmistus, reseptien kehittäminen ja testaaminen, jotta kovettuneena betoni täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset, on sekä tekniikkaa että luovaa ja rohkeaa ajattelua. Usein erikoiskohteissa suunnittelijat tekevätkin tiivistä yhteistyötä betonitehtaiden ammattilaisten kanssa: suunnittelijat kertovat kaikki tarpeensa ja betonin lopullisen käyttötarkoituksen, ja tehdas kehittää ja testaa nämä tarpeet tyydyttävät betonireseptit. Välillä testaaminen saattaa ottaa viikkoja tai jopa kuukausia, mutta mitä enemmän betonirakenteita maailmassa pystytetään, sitä monipuolisemmaksi tehtaiden betonivalikoima muodostuu – ja sitä tarkemmin voidaan valita juuri tiettyihin kohteisiin sopivia betoneita.

#### 2.3.5 Venäjän betonimerkinnot

Venäjän standardeissa ja suunnitelmissa betonilaatu merkitään niin, että merkinnästä selviävät vaadittu puristuslujuus, pakkasenkestävyys ja vesitiiveys: esimerkiksi B25 F200 W6. Tässä esimerkissä kyse on siis betonista, jonka kuutiopuristuslujuus on 25 MPa, kovettuneena se kestää ainakin 200 jäätymis-sulamissykliä menettämättä kriittisesti lujuuttaan, ja sen vesitunkeuma millimetreinä on välillä 60...150 mm sen jälkeen,

kun betonin pintaan on kohdistettu vesipainetta 0,5 MPa:n verran 72 tunnin ajan. Taulukko 3 havainnollistaa, mitä eurooppalaisten standardien mukaisia betoneita Venäjän standardien mukaiset betonimerkinnät suunnilleen vastaavat.

Taulukko 3. Venäläisten ja eurooppalaisten standardien mukaiset betonimerkinnät, suuntaa-antavia esimerkkejä.

Venäjällä käytettävä merkintä	Suomessa käytettävä merkintä
B25 F50 W4	C20/25
B45 F200 W16	C35/45 XF1 (täyttää myös XF3-vaatimuksen), vesitiivis
B60 F300 W20	C50/60 XF3, vesitiivis

Edellä olevan taulukon esimerkkejä ei kuitenkaan voida rinnastaa toisiinsa suoraan, koska standardit määrittelevät betonin jokaisen ominaisuuden raja-arvot eri suuruisiksi. Taulukon tietoja voidaan siis pitää suuntaa-antavina, mutta ei kuitenkaan määräävinä. Lisäksi Suomessa ja Venäjällä betonin sulfaatinkestävyys ja muut erikoisrasitukset merkitään eri tavoilla.

### 3 Betonin puristuslujuuden osoittaminen

Betonimassasta ei voida koskaan nähdä etukäteen, kuinka luja betonista tulee kovettuaan. Paikallavalurakentaminen on siis aina riskiä, tosin edellisen vuosisadan aikana betonin lujuutta ja muita ominaisuuksia koskevia riskejä on onnistuttu minimoimaan sekä kehittämällä uusia reseptejä että tekemällä ennakkokokeita tehtailla. Betonin käytön suosio perustuu kuitenkin nimenomaan sen hyvään puristuslujuuteen, ja tätä betonin ominaisuutta voidaan sanoa sen tärkeimmäksi valiksi. Rakenteiden kantokykyä ja sen kautta myös turvallisuutta testataan muun muassa osoittamalla, että rakenteisiin käytetty betoni täyttää sille asetetut puristuslujuusvaatimukset. Kovettuneen betonin lujuuskokeita on olemassa erilaisia, ja lujuuskoemenetelmät voidaan jakaa kahteen luokkaan: rikkoviin ja rikkomattomiin. Tässä luvussa perehdytään siihen, miten betonin puristuslujuus voidaan osoittaa erilaisin kokein – niin betonitehtailla kuin rakennustyömailla tai vanhoissa rakennuksissa. Suomessa ja Venäjällä käytettävät standardit ovat joiltakin osin toisistaan poikkeavia, mutta niiden tarkoitus pysyy kuitenkin samana: rakentajan on aina pystyttävä osoittamaan, että rakenteisiin käytetty betoni täyttää sille asetetut lujuusvaatimukset.



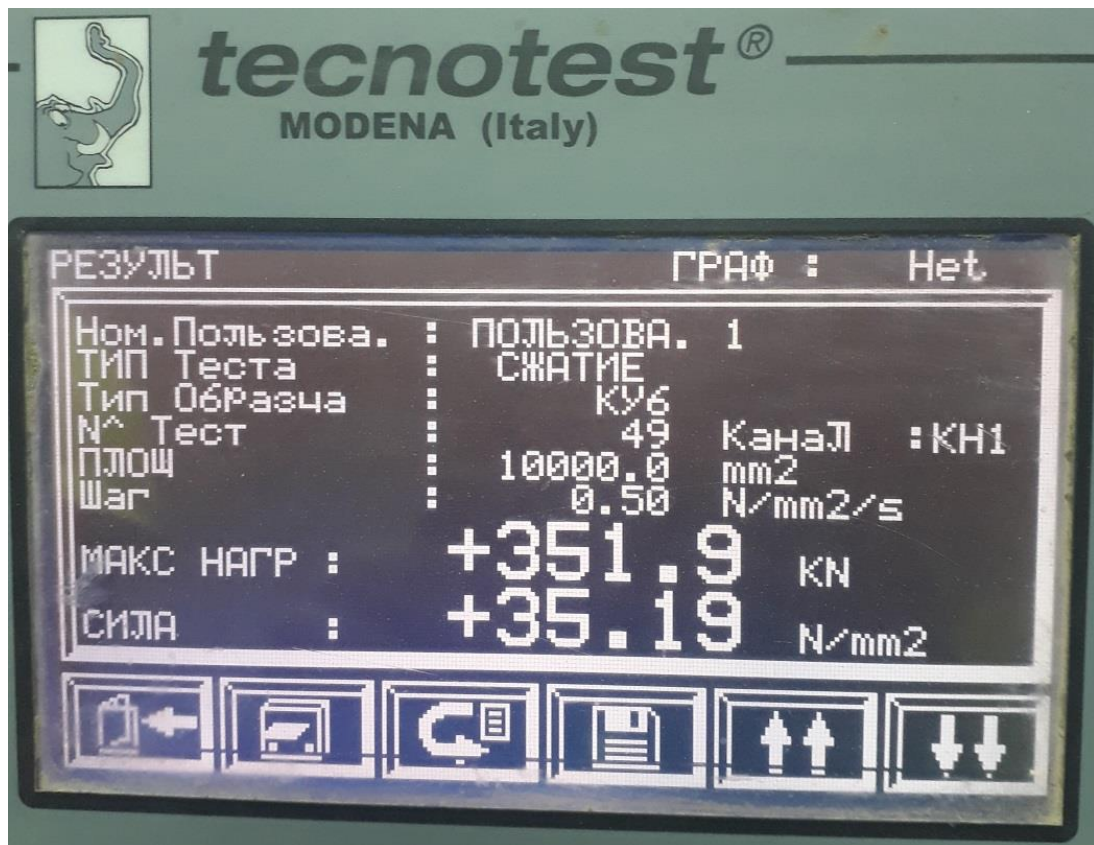
Betonin nimellislujuus on se lujuus, jonka betonin on saavutettava 28 vuorokauden iässä. Kaikki betonin lujuutta koskevat testit suoritetaan siis nimenomaan tässä betonin iässä, tosin työmailla saatetaan suorittaa koekappaleiden lujuuskokeita myös aikaisemmissa vaiheissa todetakseen betonin riittävä muotipurku- tai jännityslujuus. Erikoistapauksissa suunnittelijat saattavat määrittää betonin nimellislujuuksia myös 7 tai 91 vuorokauden iässä, mutta tällaiset tapaukset ovat melko harvinaisia.

### 3.1 Esivalmistetut koekappaleet

Tehtailla valmistettavan betonin puristuslujuuden osoittaminen tapahtuu esivalmistettujen koekappaleiden avulla. Niin Suomessa kuin Venäjälläkin on olemassa tiettyjä normeja, joiden mukaan tehtaiden tulee valmistaa koekappaleita. Suomessa koekappalevaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 12390-1, ja se käsittää koekappaleiden muodot, mitat ja sallitut mittapoikkeamat. Vaikka koekappaleina voivat toimia niin kuutiot kuin myös prismat ja lieriöt, tässä opinnäytetyössä rajoitutaan kuution muotoisiin koekappaleisiin, koska Venäjällä tehtaot osoittavat valmistamansa betonien puristuslujuutta juuri koekuutioiden avulla.

Ennen koetta koekappaleet punnitaan ja mitataan niiden sivut varmistuakseen, että koekappaleet eivät ylitä standardien sallimia mittapoikkeamia. Koekappaleiden massat ja mitat merkitään koepöytäkirjaan. Itse koemenetelmä on melko yksinkertainen: koekappale sijoitetaan testauskoneeseen, joka kuormittaa koekappaletta koko ajan kasvavalla voimalla. Voiman hetkellisen suuruuden tulee näkyä laitteen näytöltä koko testin ajan. Voiman kasvunopeus on myös määritelty standardeissa, koska suurilla voimanlisäysnopeuksilla tapahtuvat testit antavat parempia puristuslujuustuloksia. Kun koekappale on rikkoutunut, mittaus pysähtyy ja koneen näyttöön tulee käytetyn puristusvoiman maksimilukema sekä joissakin koneissa myös valmiiksi laskettu paine eli voiman suuruus jaettuna koekappaleen pinta-alalla (kuva 3). Voiman yksikkönä toimii kN ja paineen yksikkönä N/mm<sup>2</sup> eli MPa, jolla ilmoitetaan myös betonin puristuslujuus.





Kuva 3. Puristuskoneen näyttö heti puristuskokeen päätyttyä.

Kuution muotoisten koekappaleiden sekä Suomessa että Venäjällä käytettävien standardien mukainen sivumitta on 150 mm. Käytännön syistä suurin osa tehtaista käyttää 100 mm:n koekuutioita, ja niitä käytettäessä puristuslujuuskokeen antamat tulokset jaetaan Suomessa kertoimella 1,03, jolloin 100 mm:n koekuution tulos muunnetaan vastaamaan virallisen 150 mm:n koekuution tulosta [1, s. 191]. Venäjällä 100 mm:n koekuutioista saadut tulokset kerrotaan 0,95:llä; näin ollen Venäjän standardien mukainen koekuutioiden vastaavuus on tiukempaa kuin eurooppalainen. Taulukko 4 antaa yleiskäsityksen siitä, miten 100 mm:n koekuutioiden tuloksien muuntaminen viralliseksi kuutiolujuudeksi poikkeaa venäläisissä ja eurooppalaisissa standardeissa.

Taulukko 4. 100 mm:n koekuutioiden ominaispuristuslujuuden muuntaminen viralliseksi eli 150 mm:n kuutiolajuudeksi. Eurooppalaisten ja venäläisten standardien vertailu.

100 mm:n koekuution rikkonut paine [MPa]	Eurooppalainen muunnos 150 mm kuutiolajuudeksi (tulos jaetaan 1,03:lla) [MPa]	Venäläinen muunnos 150 mm kuutiolajuudeksi (tulos kerrotaan 0,95:lla) [MPa]
22,18	21,53	21,07
34,11	33,12	32,40
48,84	47,42	46,40
60,22	58,47	57,21
74,46	72,29	70,74

Taulukosta 4 ilmenee, että pienempien lujuusluokkien betoneissa ero on melkein olematon, mutta mitä järeämpiin lujuusluokkiin siirrytään, sitä tiukemmiksi Venäjän standardit muuttuvat eurooppalaisiin standardeihin nähden. Tällaisia erilaisista muunnoskäytännöistä syntyviä eroja ei kuitenkaan voida pitää määräävinä vaan enemmänkin huomion arvoisina. Toisaalta, rajatapauksissa eurooppalaisten standardien mukaan laskettu kuutiolujuus voi täyttää betonille asetetut lujuusvaatimukset, mutta Venäjällä sama tulos ei olekaan hyväksyttävä.

### 3.2 Rakenteesta poratut koekappaleet

Betonin puristuslujuuden selvittäminen rakenteesta porattujen koekappaleiden avulla on toinen rikkova betonin puristuslujuuden arviointimenetelmä. Eurooppalaisten standardien mukaan edellisessä kappaleessa mainittuja 150 mm:n kokoisia koekuutioita vastaavat ne rakenteesta poratut koekappaleet, joiden pituus ja halkaisija ovat kumpikin 100 millimetriä. Rakenteesta porattujen koekappaleiden eli testauskohtien lukumäärän on oltava vähintään kolme jokaista testausaluetta kohti. Testausalueeksi sanotaan yhtä tai useampaa samankaltaista kantavaa rakenneosaa, jotka tiedetään olevan samaa lujuusluokkaa ja betonilaatua. [8, s. 10.]

Koekappaleiden poraaminen tulee usein kysymykseen, kun betonin valmistajan ja tilaajan välillä on betonin puristuslujuutta koskeva kiista: esimerkiksi kun työmaa on tehnyt tehtaan lisäksi myös omia lujuuskokeita, jotka osoittivat, että betoni ei täytä sille asetettuja lujuusvaatimuksia. Porattuja koekappaleita voidaan siis pitää niin sanottuna viimeisenä totuutena, kunhan on varmuutta, että työmaalla ollaan toimittu oikein niin valutyön kuin betonin jälkihoidonkin kannalta. Näin ollen, ennen kuin päätetään porausnäytteiden määrä, niiden koot ja paikat, kokeet täytyy suunnitella ottaen huomioon porauksen aiheuttamat vauriot eli käytännössä on varmistettava, että näyteporaus ei tule aiheut-

tamaan rakenteellisia seuraamuksia: porauksia ei esimerkiksi tulisi tehdä rakenteiden liitoskohtien läheisyydessä tai betonielementtien laidoilla [9, s. 5].

Poranäytteiden kokoa päätettäessä on otettava huomioon betonin maksimiraekoko: kun porausnäytteen halkaisijan ja betonin runkoaineen maksimiraekoon suhde on pienempi kuin 3, eurooppalaisten standardien mukaan lujuustuloksia ei voida pitää luotettavina. Lisäksi porauksen yhteydessä on vältettävä poraamista raudoituksen läpi, jotta näytteestä tulisi mahdollisimman todenmukainen. Poraus tapahtuu kohtisuoraan betonipintaa vasten (kuva 4). Kaikki poranäytteet merkitään ja niiden sijaintitiedot kirjataan muistiin. [9, s. 5]



Kuva 4. Poranäytteen ottaminen valmiista betonirakenteesta.

Ennen puristustestin suorittamista poranäytteet tutkitaan silmämääräisesti ja mittalaitteiden avulla. Kaikki irtain aines poistetaan. Näyteliერიөiden päät katkaistaan standardin SFS-EN 12390 3:2019 vaatimusten mukaisiksi: näytteiden kosketuspintojen täytyy olla tasaisia ja niiden täytyy olla kohtisuorassa koelieriön pituusakseliin nähden. Puristustestauksessa syntyvät tulokset merkitään muistiin ja, jos on käytetty halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm:n lieriöitä, tuloksia voidaan verrata vastaaviin 150 mm:n kuutioista saatuihin tuloksiin.

Poranäytteitä koskevat Venäjän standardit poikkeavat EN-standardeista vain vähän: periaate on sama, mutta poranäytteiden mitoille on asetettu eri vaatimuksia. Esimerkiksi poranäytteen pienimmän mitan ja betoniin käytetyn kiviaineksen maksimiraekoon suhteen tulee olla suurempi kuin 2, kun kyse on puristuskokeista, ja suurempi kuin 3, kun poranäytteistä on tarkoitus selvittää betonin vetolujuus. Lisäksi poranäytteiden määrästä riippuvat poranäytteiden koot: jos sarjassa on kaksi poranäytettä, niiden minimimittojen tulee olla 90 mm tai enemmän; kolmen poranäytteen tapauksessa minimimittojen on oltava välillä 61...90 mm, ja kun rakenteesta otetaan neljä poranäytettä, niiden pienimmät mitat voivat olla alle 60 mm [10, kappale 1.2]. Kun sarjassa on kaksi näytettä, puristuslujuudeksi lasketaan niiden keskiarvo; kolmen poranäytteen tapauksessa puristuslujuus lasketaan myös kahden näytteen keskiarvoksi poistamalla sarjassa heikoin tulos, ja neljän näytteen tapauksessa betonin puristuslujuus on kolmen suurimman tuloksen keskiarvo. Puristuskokeita varten poratun sylinterin halkaisija ja korkeus voivat Venäjän standardien mukaan olla niinkin pieniä kuin 44,0 x 35,2 mm vastaavasti, mutta tällaisessa rajatapauksessa on otettava huomioon edellä mainittu poranäytteen pienimmän mitan ja betonin maksimiraekoon suhde. Kun Venäjällä käytetyin betonimassa on maksimiraekooltaan 20 mm, näin pieni lieriö sopii vain hienompien betonien tapauksiin.

Suomessa käytettävien standardien vaatimukset puolestaan määräävät, että 50 mm:n kokoisia poranäytteitä tulee ottaa ainakin kolminkertainen määrä ja kooltaan 50...100 millimetrin välillä olevien poranäytteiden määrää voidaan interpoloida. Taulukko 5 havainnollistaa, kuinka monta poranäytettä on otettava niiden koosta riippuen venäläisten ja eurooppalaisten standardien mukaan.

Taulukko 5. Poranäytteiden vähimmäismäärä niiden halkaisijasta riippuen eurooppalaisten ja venäläisten standardien mukaan.

Poranäytteen pienin mitta, mm	≤57	58-66	67-74	75-82	83-91	92-99	≥100
Poranäytteiden vähimmäismäärä, venäläinen standardi GOST 28570-2019	4	3-4	3	3	3	2	2
Poranäytteiden vähimmäismäärä, Suomessa käytettävä standardi SFS-EN 13791:2007	9	8	7	6	5	4	3

Taulukosta 5 ilmenee hyvin selkeästi, kuinka eurooppalaiset standardit ottavat huomioon poranäytteiden pienien mittojen aiheuttaman hajonnan lujuuskoetuloksissa. Poranäytteillä tehtävät lujuuskokeet ovat kuitenkin ajatukseltaan samanlaisia koko maailmassa. Taulukko 5 vain muistuttaa, että suuremmilla poranäytteillä saadaan tarkempia tuloksia, kun taas pienempien poranäytteiden tapauksessa niitä täytyy olla enemmän suuremman hajonnan takia. Tästä asiasta sekä eurooppalaiset että venäläiset standardit ovat samaa mieltä, tosin eri mittakaavassa.

### 3.3 Ultraäänen etenemisnopeus

Yksi rikkomattomista betonin puristuslujuuden testausmenetelmistä on betonissa etenevän ultraäänen nopeuden selvittäminen ja sen suhteuttaminen betonin lujuuteen. Suomessa tämän menetelmän käyttö on melkein olematonta: vaikka sille on olemassa erillinen Suomessakin hyväksytty standardi SFS-EN 12504-4 (Testing concrete. Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity; vahvistettu 08.11.2004), standardia ei käännetty suomeksi, ja ultraäänimenetelmän käyttö tulee mahdollisesti pysymään hyvin alhaisessa suosiossa Suomen rakennustyömailla myös tulevaisuudessa. Venäjällä ultraäänen käyttö betonirakenteiden puristuslujuuden määrittämisessä on puolestaan melko suosittua, mutta sielläkään tätä menetelmää ei voida käyttää ainoana betonin testaustapana, koska kyseessä on epäsuora menetelmä.

Ultraäänilaite mittaa nopeuden, jolla ultraääni kulkee testattavassa betonissa. Sen perusteella ei kuitenkaan voida tehdä suoria johtopäätöksiä, mitä lujuusluokkaa betoni on, koska ultraäänen etenemisnopeus riippuu monesta muustakin tekijästä kuin betonin puristuslujuudesta: esimerkiksi betonin ilmamäärästä. Sitä varten, että ultraäänen etenemisnopeuden perusteella voidaan arvioida betonin puristuslujuus, täytyy selvittää eri koemenetelmillä saatujen tuloksien vastaavuus. Käytännössä tämä tarkoittaa melko työläitä valmisteluja jatkotestien helpottamiseksi.

Epäsuoran ja suoran testimenetelmän tuloksien vastaavuus määritetään standardin SFS-EN 13791:2007 mukaisesti. Työmaalla helpoin tapa määrittää tuloksien vastaavuus on sellaisen menetelmän käyttö, joka edellyttää suhteellisen vähän ennakkotestejä. Vastaavuuden määrittämisen jälkeen sitä voidaan käyttää jatkotesteissä kaikille samasta betonista valetuille rakenteille.



Paikallavalutyömaan alussa on harvemmin sellaisia rakenteita, joista ei saisi ottaa poranäytteitä. Näin ollen on hyvä selvittää suoran ja epäsuoran menetelmän tuloksien vastaavuus jo alussa niin, että jatkossa samankaltaisista materiaaleista ja samankaltaisella tuotantotekniikalla tuotetun betonin puristuslujuus voidaan arvioida pelkkien epäsuoran menetelmän antamien tuloksien avulla. Menettely on melko yksinkertainen. Ensin valitaan testausalue, johon merkitään vähintään yhdeksän testauskohtaa – testausalueena voi toimia vaikka useampi iso antura, pohjalaatta tai paksu tukimuuri. Jokaisesta testauskohdasta mitataan ultraäänien etenemisnopeus ja tulos kirjataan muistiin. Sen jälkeen samoista kohdista porataan koekappaleet, jotka testataan luvussa 3.2 kerrottujen menetelmien mukaan. Kun betoni on testattu ja käytössä on tulospareja eli suoran ja epäsuoran testausmenetelmän tuloksia, määritetään tuloksien vastaavuus standardin SFS-EN 13791:2007 laskentakaavojen mukaisesti. Jatkossa työmaalla voidaan käyttää epäsuoraa menetelmää niin, että sen tuloksien perusteella määritetään betonin ominaispuristuslujuus ja todetaan sen vaatimustenmukaisuus. Venäjällä on käytössä vastaava tuloksien vastaavuusperiaate, tosin Venäjän rakennusnormit antavat rakentajille enemmän valinnanvaraa: poranäytteiden ja esivalmistettujen koekappaleiden lisäksi vastaavuuden perustana voidaan käyttää ulosvetovoimakokeilla saatuja tuloksia. Toisaalta, Venäjän normit vaativat vähintään kaksitoista tulosparia epäsuoran ja suoran koemenetelmän vastaavuuden määrittämiseen.

### 3.4 Kimmoarvo

Kimmoarvo on toinen epäsuora betonin puristuslujuuden arviointimenetelmä, jonka tuloksia ei voida lukea suoraan vaan niistä on muodostettava vastaavuus edellisessä luvussa kerrottujen sääntöjen mukaan. Betonin kimmoarvon määrittäminen toimii hyvänä apuna työmaalla, kun halutaan selvittää esimerkiksi jonkun rakenteen betonin tasalaatuisuus tai päättää, täytyykö epäilyttävältä vaikuttavasta betonirakenteesta suorittaa jatkokokeita.

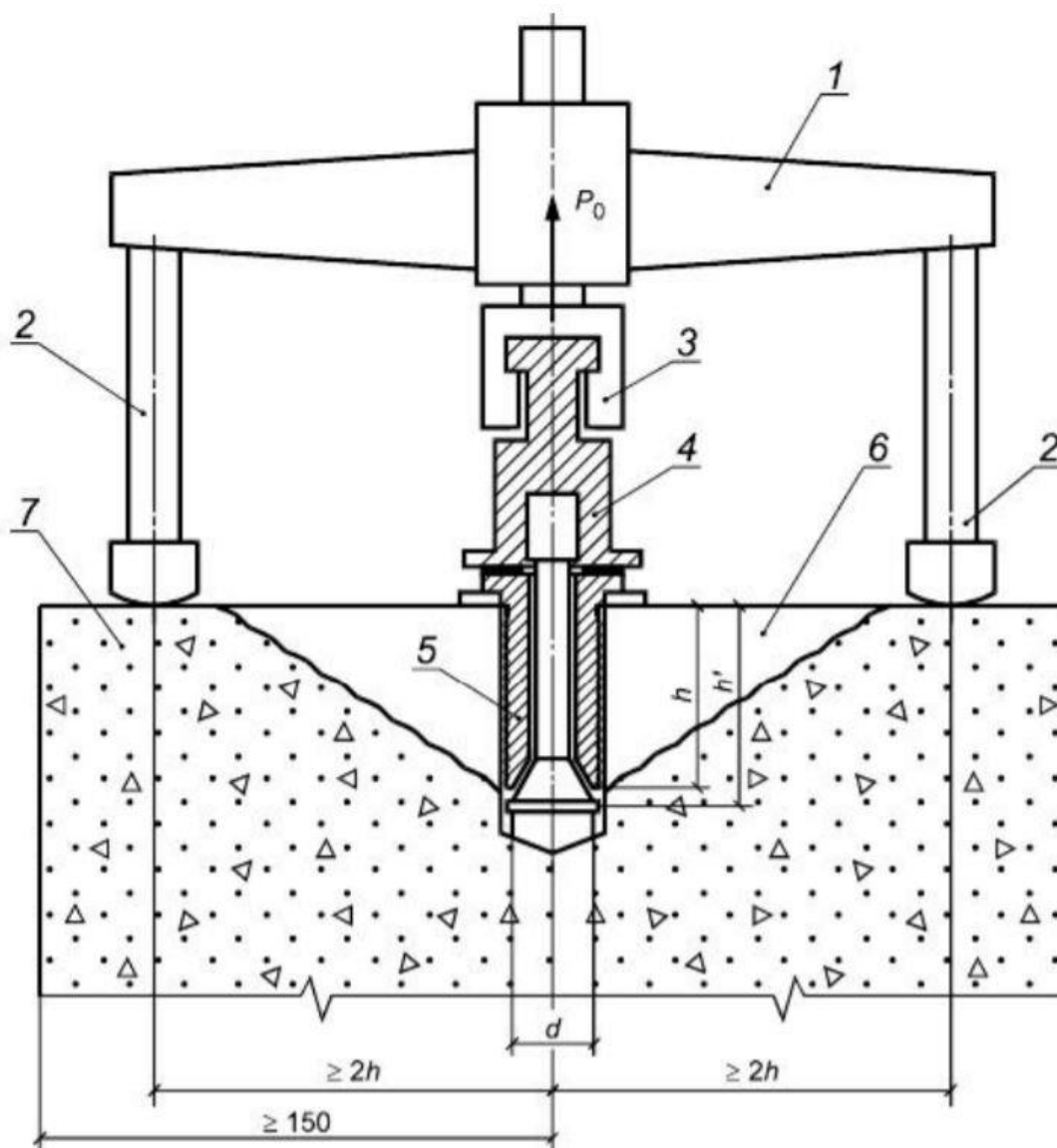
Itse kimmovasara on laite, jonka sisällä on jousi. Jousi lähettää kimmovasaran sisällä olevan pallon painon koepintaan ja sen jälkeen pallo palaa takaisin. Menetelmä perustuu energian muutokseen: mitä vähemmän liike-energiaa jousen liikkeelle lähettämä pallo on menettänyt iskun jälkeen, sitä lujempaa on betoni. Eri lujuusluokille on olemassa omia kimmovasaroita, joiden koko, paino ja hinta saattavat vaihdella merkittävästi, ja on erittäin tärkeää käyttää betonin kimmoarvoa määritettäessä juuri kyseiselle

lujuusluokalle tarkoitettua kimmovasaraa. Testauskohtien määrä päätetään standardin SFS-EN 13791 mukaisesti huomioiden myös ne asiat, jotka vaikuttavat testin tuloksiin, eli esimerkiksi betonin pintatyyppi, pinnan kosteus ja iskun suunta. Luotettavana testausalueena voidaan pitää sellaista aluetta, jonka sisällä olevat testauskohdat ovat samankaltaisia. [11, s. 4-5.] Sen jälkeen, kun testauskohtien kimmoarvot on mitattu kimmovasaralla, samoista kohdista porataan koekappaleet ja toimitaan samalla tavalla kuin ultraäänen etenemisnopeustestin tapauksessa: määritetään betonin lujuuden ja kimmoarvon vastaavuus, jonka perusteella kimmovasaraa voidaan käyttää työmaalla jatkossakin betonin ominaispuristuslujuuden arviointiin.

### 3.5 Ulosvetovoima

Ulosvetovoimaan perustuva betonin testaus on melko harvinainen menetelmä Suomessa, kun taas Venäjällä sitä käytetään erittäin laajasti ja pidetään yhtenä luotettavimmista betonin puristuslujuuden arviointimenetelmistä. EN-standardien mukaan sitä voidaan käyttää vain epäsuorana menetelmänä; Venäjällä ulosvetokoe luokitellaan suoraksi rikkomattomaksi menetelmäksi.

Betonin ulosvetovoiman mittaamiseen on olemassa useampia tapoja ja laitteita, mutta perusperiaate pysyy samana: betoniin upotetaan koekappale, joka voi olla ennakkoon asennettu teräslevy tai jälkeen päin porattuun reikään sijoitettu ankkuri, ja vedetään kyseistä kappaletta betonista ulospäin, kunnes betonin pinta kappaleen ympärillä rikkoutuu. Menetelmä edellyttää sitä, että ulos vedettävä osa on erittäin vahvasti kiinni betonissa. Kuva 5 havainnollistaa, miten koe tapahtuu ja mikä on ulosvetokoelaitteen toimintaperiaate. Kuvan mukaista laitetta käytetään Venäjällä erittäin laajasti kokeen ollessa suhteellisen luotettava ja helppo tapa selvittää rakennebetonin puristuslujuus.



Kuva 5. 1 - mittauslaite; 2 - mittauslaitteen tuke; 3 ja 4 - laitteen voimansiirtoelementit; 5 - ankuri; 6 - ulosvedettävä betoni (oletettu); 7 - testattava rakenne [12, liite A].

Mittauslaitteella on kolme tukea. Ennen kokeen aloittamista rakenteeseen porataan reikä, johon asennetaan testiankkuri. Ankkuri kiristetään niin, että se on erittäin vahvasti kiinni sitä ympäröivässä betonissa. Momenttivaatimuksia ei kuitenkaan ole. Kun ankkuri on kiristetty, sen päähän liitetään mittauslaite. Kokeen aikana mittauslaite kasvattaa ankkuriin kohdistuvaa vetovoimaa koko ajan siihen saakka, kunnes betonista irtoutuu kartion muotoinen osa (kuvassa 5 merkitty numerolla 6). Tämä on laajimmin käytetty menetelmä, mutta Venäjän standardin mukaan vetokokeeseen voidaan käyttää myös eurooppalaisessa standardissa mainittuja tartuntaosia. Niiden käyttö on kuitenkin olematonta, sillä se edellyttää tartuntaosien asentamista rakenteeseen jo ennen valua. Venäjän standardien mukaiset testiankkurit edellä kuvattua laitetta käytettäessä



voivat olla joko 16 tai 24 millimetriä, ja ankkureiden tartuntapituudet ovat silloin vastaavasti 35 ja 48 millimetriä. 16-millisten ankkureiden käyttö soveltuu sellaisten betonien testeihin, joiden puristuslujuus on 40...100 MPa, ja 24-millisiä ankkureita voidaan käyttää kaikissa betoneissa, joiden lujuus on välillä 5...100 MPa. [12, taulukko A.1.]

Vaikka EN-standardit pitävät ulosvetokoetta melko epäilyttävänä menetelmänä, Venäjällä kyseisellä menetelmällä saaduilla tuloksilla on suuri merkitys. Venäjän standardit eivät edellytä tässä tapauksessa vastaavuuden määrittämistä kokeellisesti, vaan se lasketaan normeista löytyvästä kaavasta: ulosvetokokeen tuloksena saatu testauspinnan pinnan rikkonut vetovoima muutetaan vastaamaan betonin kuutiolujuutta kertoimien avulla. Kertoimet riippuvat vain kolmesta tekijästä: betonityypistä, käytettävän ankkurin parametreista sekä betonin maksimiraekoosta. Nykypäivänä käytettävät ulosvetokoelaitteet antavat koetuloksen jo betonin kuutiopuristuslujuudeksi muunnettuna, mutta on erittäin tärkeää muistaa syöttää koneeseen oikeat ankkuri- ja betonitiedot.

### 3.6 Venäjän standardit betonin lujuuden osoittamisessa

Venäjällä työmaalla tapahtuva betonin lujuuden vaatimustenmukaisuuden osoittaminen on monimutkainen asia. Työmaalla valettuja koekuutioita voidaan käyttää rakenteissa olevan betonin lujuusluokan määrittämiseen vain poikkeustilanteissa, kun ei ole muita mahdollisuuksia selvittää betonin lujuus. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi porapaa-lut, joista ei voi ottaa poranäytteitä eikä ulosvetokokeita. Näissä tilanteissa käytetään Venäjän standardien lausetta, jonka mukaan rakenteessa olevan betonin lujuus voidaan osoittaa työmaalla valmistettujen koekappaleiden avulla, kunhan ne kovettuvat standardin edellyttämissä olosuhteissa [13, luku 4.3].

Kuten luvussa 3.5 jo mainittiin, Venäjällä ulosvetokoetta pidetään hyvin luotettavana betonin puristuslujuuden testausmenetelmänä. Poranäytteitä tehdään yleensä silloin, kun tietyn rakenteen betonin lujuus on erittäin kyseenalaista ja on syytä epäillä, että betoni ei täytä sille asetettuja vaatimuksia. Vetokokeet kuitenkin jättävät jälkiä betonirakenteiden pintoihin, ja tästä syystä monella työmaalla suositetaan ultraäänitutkimuksia, jotka eivät jätä betonin pintaan mitään. Lisäksi kaikissa kokeissa noudatetaan standardeja, joiden mukaan määritetään varmuuskertoimet lujuustesteissä saaduille tuloksille. Logiikka on melko yksinkertainen: mitä vähemmän testejä on tehty, sitä kireämpiä lujuusvaatimuksia on joka testitulokselle. Suomessa käytössä olevia standardeja muistut-

tava laskentakaava perustuu vähintään 30 koetulokseen tehtaalla tapahtuvassa laadunvalvonnassa ja vähintään 20 koetulokseen työmaalla tapahtuvassa laadunvalvonnassa. Saaduista tuloksista lasketaan keskiarvo ja hajonta, minkä perusteella määritetään betonin toteutunut lujuusluokka. Venäjän standardien mukainen kirein laskentakaava ei puolestaan perustu koetuloksien keskiarvoon eikä tuloksien keskihajontaan vaan toimii yksiselitteisesti: betonin puristuslujuuskokeen tulos kerrotaan kertoimella 0,8 ja saatua lukua pidetään betonin toteutuneena eli faktisena puristuslujuutena. Esimerkiksi B45 (vastaa lujuusluokkaa C35/45) betonin tapauksessa se tarkoittaa, että jokaisen työmaalla valmistetun koekuution puristustestin tai minkä tahansa muun työmaan laadunvalvonnan osana suoritettujen kokeiden tulos ei saa jäädä alle 56,25 MPa. Näin rakenteisiin tulee merkittävästi ylilujuutta, varsinkin kun puhutaan korkeampien lujuusluokkien betoneista. Työmaalla käytettävä laskentakaava eli keskiarvoon ja hajontaan perustuva kaava tai yksiselitteinen kaava standardien mukaisilla kertoimilla täytyykin aina ilmoittaa betonia toimittavalle tehtaalle, koska jälkimmäiseksi mainitulle laskentakaavalle laaditut betonireseptit poikkeavat niistä, joista tehtyjen lujuuskokeiden tuloksia käsitellään keskihajonnan mukaan. Reseptien ero tarkoittaa tässä tapauksessa usein myös hinnan eroa.

## 4 Ongelman kuvaus ja tutkimussuunnitelma

### 4.1 Ongelman taustaa

Venäjän rakennusnormit edellyttävät betonin puristuslujuuskokeiden suorittamista betonitehtaiden lisäksi myös työmailla. Työmailla suoritettujen kokeiden tulokset poikkeavat tehtaan saamista tuloksista säännöllisesti, mutta tehtaan ja työmaan saamia lujuuskoetuloksia ei voida suoraan vertailla toisiinsa erilaisten koemenetelmien takia: tehtailla tehdään koekappaleita, kun taas työmailla joudutaan suorittamaan vetokokeita ja niiden lisäksi voidaan tehdä ultraäänikokeita. Tätäkin tärkeämpi tekijä on työmaan toiminta valutoissa: asiassa ei olisi ollut mitään haastetta, jos kaikki betonitehtaat olisivat täysin varmoja siitä, että kaikilla työmailla toimitaan kaikkien rakennusnormien ja hyvän rakentamistavan mukaan. Todellisuus on kuitenkin se, että usein valut tapahtuvat työmailla täysin kokemattomien rakennusmiesten voimin.

Välillä nähdään myös sitä, että betoni tilataan etuajassa: niin, että rakenteet eivät ole vielä täysin valmiita valuun, mutta betonikuorma on jo tulossa. Tästä tulee ongelmia

kesällä, kun betonialauto odottaa purkua kuumalla säällä ja betonin työstettävyyttä huononee nopeasti. Monesti asiaan puututaan työmaan puolelta lisäämällä betonialautoon vettä. Tätä tekevät rakennusmiehet voivat salata asian tai lisätä vettä esimerkiksi vastuutoman työnjohtajan luvalla. Myös betonin tiivistäminen on osoittautunut monelle rakennusmiehelle haasteeksi, ja joitakin rakenteita joudutaan piikkaamaan pois muottien avaamisen jälkeen. Vaadittua huonommin järjestetyillä työmaakäytännöillä on selkeä seuraus: valmiiden betonirakenteiden lujuus laskee, mikä käy ilmi työmaalla tehtävistä kokeista. Työmailta saattaa tulla reklamaatioita tehtaalle, ja sillä hetkellä tehtaalla ei ole olemassa mitään muuta todistusaineistoa kuin omia kuutioiden puristuskokeiden tuloksia. Tästä syystä päätettiin, että tehtaalla on erittäin hyödyllistä tietää, miten erilaiset betonin puristuslujuuskoemenetelmien tulokset poikkeavat toisistaan: onko suurin osa reklamaatioista aiheellisia vai johtuvatko työmaan ja tehtaalla erilaiset lujuuslukemat joistakin muista tekijöistä.

#### 4.2 Tutkimustoimenpiteiden suunnitelma

Sitä varten, että erilaisten lujuuskoemenetelmien tuloksia voitaisiin vertailla toisiinsa, tehtaalla on saatava käyttöönsä omaa aineistoa: niin, että se kootaan samojen periaatteiden mukaan kuin työmaankin tulosaineisto. Tehdas valvoo betonin lujuustasoa 100 mm:n kokoisten koekuutioiden puristuskokeiden avulla, kun taas työmailla suoritetaan myös muita kokeita. Näin ollen päätettiin, että tehtaalla alueella valetaan tavanomaisten koekuutioiden lisäksi kaksi raudoittamatonta palkkia, joista otetaan sekä ulosveto- että ultraäänikokeita, minkä lisäksi saaduista rakenteista otetaan poranäytteet ja viedään ne testattavaksi akkreditoituun instituuttiin.

Testattaviksi betoneiksi päätettiin ottaa kaksi erilaista betonimassaa. Koekuutioiden normaali tehtaalla valmistama määrä on 2+2+2 massaa kohti niin, että kaksi koekuutiota puristetaan aina 3, 7 ja 28 vuorokauden iässä. Kun kyseessä on kaksi erilaista massaa, koekuutioita tuli siis valmistaa yhteensä 12. Väliaikaiset tulokset kolmen ja seitsemän vuorokauden iässä eivät ole tämän tutkimuksen kannalta merkitseviä, mutta kokeet kuitenkin tehdään tehtaalla tavanomaisen käytännön mukaan. Palkit päätettiin vala 0,3 x 2,4 x 0,6 metriä kokoihin muotteihin.

Tehtaalla valmistamat koekuutiot säilytetään aina siihen tarkoitettuun niin sanotussa ”normaalin kovettumisen komerossa”, jossa vallitsevat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet

ovat ideaaleja betonille sen kovettumisaikana: lämpötila on  $20 \pm 2$  °C ja ilman kosteus  $95 \pm 5$  % [14, liite B]. Koepalkkeja ei kuitenkaan voida tuoda kyseiseen komeroon vaan ne jätetään kovettumaan ulkona, mikä tarkoittaa sitä, että koekuutioiden ja palkkien kovettumisolosuhteet tulevat olemaan erilaisia. Toisaalta, koepalkit ovat paljon massiivisempia rakenteita kuin koekuutiot, ja näin ollen palkeissa hydrataatioreaktion yhteydessä tapahtuva lämmönkehitys tulee olemaan paljon havainnollisempi kuin koekuutioissa, joiden sisällä lämpötila ei nouse yhtä merkittävästi: pienisärmäinen koekuutio luovuttaa lämpöä ympäristöön hyvin nopeasti, mitä ei tule tapahtumaan palkeissa. Palkkien sisällä vallitsevia lämpötiloja päätettiin seurata lämpötila-antureiden avulla niin, että lämpötilaa mitataan kahden tunnin välein 28 vuorokauden aikana. Antureita päätettiin asentaa yhteensä neljä: kummankin palkin keskelle ja kummankin palkin reunaan. Oletuksena on, että lähempänä palkin reunaa betonin lämpötila tulee olemaan matalampi kuin palkin keskellä. Lisäksi tarkistettiin sääennuste seuraavalle 28 vuorokaudelle, ja sen mukaan keskilämpötila päivisin tulisi olemaan noin 16 °C ja öisin noin 10 °C. Oletetaan kuitenkin, että palkeissa tapahtuva lämmönkehitys tasapainottaa lämpöolosuhteiden erot, joten koekuutioista ja palkeista saatavia lujuustuloksia voidaan verrata toisiinsa.

## 5 Tutkimuksen kulku

### 5.1 Valmistelut tehtaalla

Tehtaalla on käytössään muotteja, joita käytetään silloin tällöin niin kutsuttujen ”betoni-norsujen” valuihin, kun jotkut betoniautot palaavat tehtaalle työmaalla ylimääräiseksi jääneen betonin kanssa. Näihin muotteihin (kuva 6) päätettiin valaa palkit, jotka jatkossa testataan.



Kuva 6. Tehtaan käytössä olevat muotit.

Muottien koko on 2,4 x 0,3 x 0,6 metriä, ja näin ollen jokaiseen muottiin tarvittiin betonia 0,432 m<sup>3</sup>. Tämä ei ole sopiva määrä erilliselle betonimassan valmistukselle, ja näin ollen päätettiin valaa koepalkit tehtaalta työmaille lähevistä betoneista. Tehtaan laitteiston operaattoreille ilmoitettiin, että täytyy valmistaa 0,4 kuution verran enemmän betonimassaa kahteen tilaukseen. Nämä tilaukset valittiin etukäteen niin, että ne edustivat kahta erilaista betonia ja lähtivät tehtaalta samana päivänä, mutta eri kellonaikaan. Koekappalevaluihin tulivat valituiksi seuraavat betonit:

1. Betoni A: B35 F150 W10, maksimiraekoko 10 mm
2. Betoni B: B30 F100 W4, maksimiraekoko 20 mm.

Kummankin betonin resepteissä käytetään portlandseossementtiä CEM II. Koekappaleiden valuihin valitut massat ovat hyvin tavanomaisia ja kuuluvat tehtaan normaalisti tuottamiin betoneihin. Pienirakeista betoni A:ta toimitetaan useimmiten paaluihin, mutta tilaajasta riippuen voidaan toimittaa myös esimerkiksi erittäin tiheään raudoitettuihin rakenteisiin; betoni B on puolestaan tavallinen esimerkiksi kantavien pystyrakenteiden valuihin käytettävä betoni.

Koekuutioiden valmistus on tavallista tehtaan rutiinia, joka ei vaadi erikoisia valmisteluja, mutta tiivistettäviä ja jälkihoidettavia elementtejä tehtaalla valmistetaan harvemmin. Ennen valupäivää tehtaalle tuotiin tärysauva (60 mm paksu, 5 metriä pitkä) ja 2 x 6 metrin kokoinen suojapeite. Betonin riittävä ja normien mukainen tiivistäminen on erittäin tärkeä rakenteen loppulujuuteen vaikuttava tekijä; normien mukainen jälkihoito estää veden ylimääräisen haihtumisen betonista, mikä puolestaan pienentää betonin varhaisvaiheen kutistumaa ja sen kautta myös halkeilua. Muita valuihin liittyviä erikoisvalmisteluja tehtaalla ei tarvittu.

## 5.2 Koekuutioiden ja -palkkien valmistus

Valut suoritettiin 23.08.2019 ulkolämpötilan ollessa 18–21 °C. Ilman suhteellinen kosteus oli päivän aikana pysynyt 70...90 %:n välillä. Koekuutiot valmistettiin tehtaan normaalien käytäntöjen mukaan ja vietiin ne kovettumaan laboratorioon (kuvat 7 ja 8).





Kuva 7. Juuri täytetystä betoniautosta kaadettiin kärryyn pieni määrä tuoreen betonin testeihin tarkoitettua betonimassaa. Kuvassa on meneillään standardien mukaisten koekuutiomuottien täyttäminen. Täytetyt muotit asetetaan sen jälkeen vibrapöydälle ja betoni tiivistyy.



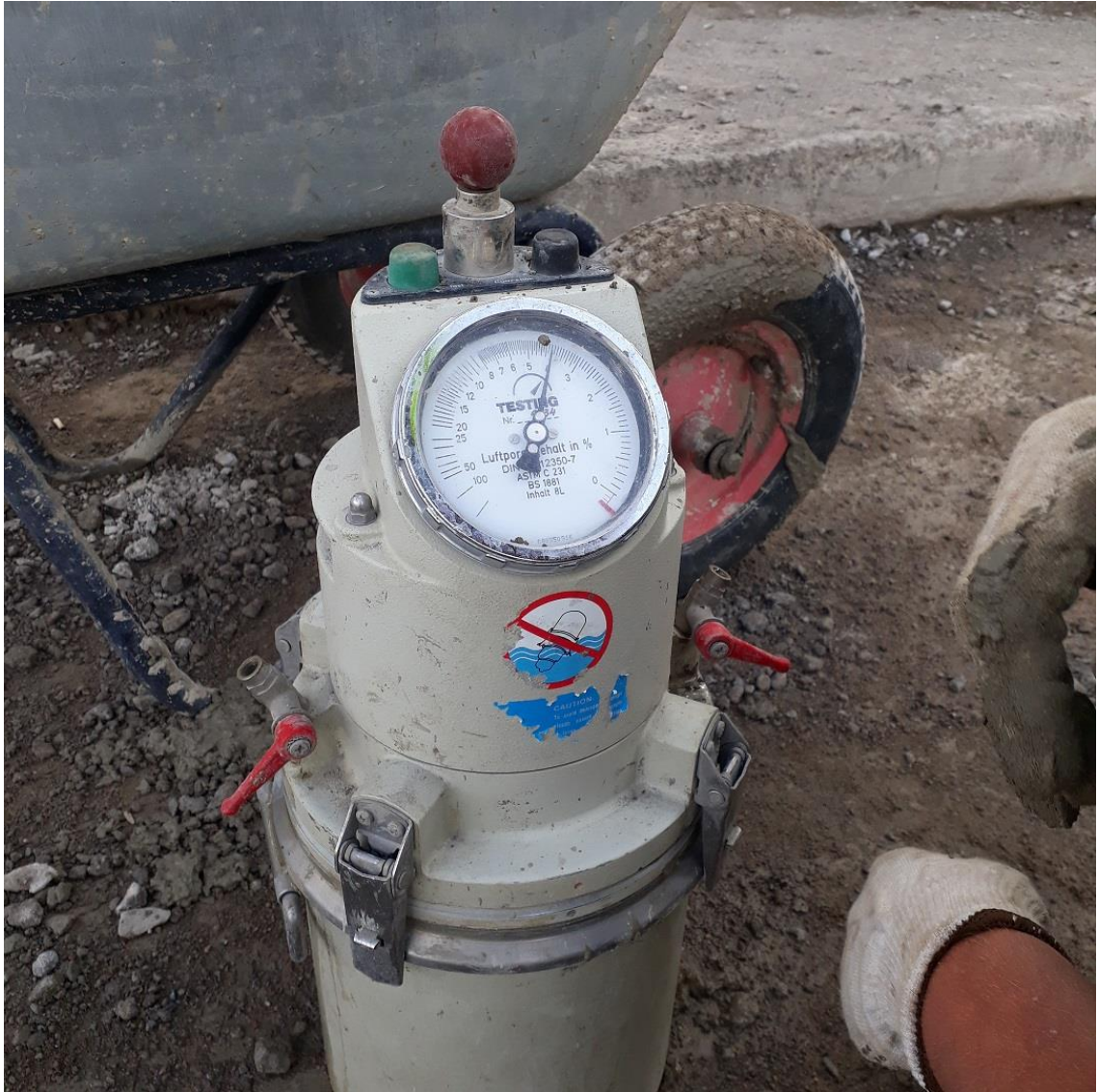
Kuva 8. Kolme koekuutiosarjaa laboratoriossa heti valun jälkeen. Jokainen kuutio merkitään tussilla, kun se puretaan koekappalemuotista, ja viedään kosteaan komeroon. Koekuutiopareja on kolme, koska kokeet suoritetaan betonin ollessa 3, 7 ja 28 vuorokauden iässä. Papereissa näkyvä ensimmäinen numero on koesarjan järjestysnumero; toinen numero on betonireseptin numero tehtaan järjestelmissä; viimeisenä on koekuutioiden valupäivämäärä.

Koekuutioiden valmistuksen jälkeen kummastakin koemassasta mitattiin ilmamäärä ja kartiopainuma. Mittausten tuloksiksi saatiin seuraavat:

- Betoni A: ilmamäärä 4,0 %, kartiopainuma 22 cm
- Betoni B: ilmamäärä 2,8 %, kartiopainuma 20 cm.

Ilmamäärä mitattiin ilman kokoonpuristuvuuteen perustuvalla manuaalisella betonimassan ilmamäärämittarilla (kuva 9).





Kuva 9. Ilman kokoonpuristuvuuteen perustuva manuaalinen betonimassan ilmamäärämittari. Mittauskannen alla oleva astia täytetään betonimassalla kolmessa kerroksessa; joka kerros tiivistetään sulloinsauvalla. Täytön jälkeen astia suljetaan mittauskannella. Vasemmalla ja oikealla olevista aukoista valutetaan vettä niin, että varmistutaan ilman puuttumisesta astiassa, lukitaan aukot punaisilla venttiileillä ja pumpataan kannen alle ilmaa niin, että astiaan syntyy ylipainetta. Korjataan painelukema laitteen nollapisteeseen. Ilman ylipaine aiheuttaa sen, että betonissa olevat ilmahuukokset supistuvat ja sen kautta astiassa olevan betonin tilavuus pienenee; samalla betonimassan ja kannen välillä oleva paine laskee. Mittaus käynnistetään painamalla laitteen vihreää nappia ja pitämällä sitä pohjassa koko mittauksen ajan, kunnes lukemanuoli pysähtyy. Laitteen antama tulos perustuu siihen, millä paineella ja mikä määrä ilmaa on poistunut laitteesta mittauksen aikana.

Kartiopainumakokeella (kuva 10) selvitettiin, vastaako betonimassa sille asetettuja notkeusvaatimuksia ja varmistuttiin siitä, että tutkittava betonimassa on lähtenyt tehtaalta hyvin työstettävänä.



Kuva 10. Painumakoe. Teräslevyn tai muun vettä imemättömän alustan päälle asennetaan standardikokoinen kartiomuotti (korkeus 300 mm, halkaisija alapäässä 200 mm ja yläpäässä 100 mm), joka täytetään testattavalla betonimassalla. Betonimassa tiivistetään sulloinsauvalla. Sen jälkeen kartiomuotti nostetaan varovasti ylöspäin, minkä seurauksena sen sisällä ollut betoni painuu kasaan, ja mitataan kartiossa olleen ja vapaasti kasaantuneen betonin korkeusero eli painuma. Tässä kuvassa painumaksi mitattiin 22 cm, mikä vastaa notkeusluokkaa S5. Tilauksessa oli kuitenkin S4 eli painuman piti olla välillä 160...210 mm, mutta työmaalle saapuessaan betonimassa oli mitä todennäköisimmin tilattua notkeusluokkaa.

Palkkien valut toteutettiin siirtämällä betonimassa betonautoista suoraan muotteihin (kuva 11). Muotit täytettiin kahdessa kerroksessa: tulevien palkkien korkeus on 600 mm, joten kerrokset tulivat noin 30 cm paksuiksi. Ensimmäinen kerros tiivistettiin normaaliin tapaan muottipintoihin koskematta. Toinen kerros tiivistettiin upottamalla tärysauva niin, että se ulottui myös ensimmäisen kerroksen betoniin. Betonin pudotuskorkeus on ollut noin metri.





Kuva 11. Ensimmäisen palkin valun alkua. Betonimassa täytyy aina pudottaa mahdollisimman pystysuoraan. Tässä valussa pystysuoruus ei näytä esimerkilliseltä, mutta pieni pudotuskorkeus ja sääntöjen mukainen tiivistäminen ovat lievittäneet massan mahdollisen erottumisriskin.

Palkkien valun jälkeen piti huolehtia myös tulevasta lämmönseurannasta. Koekuutioiden tapauksessa lämmönseuranta ei ollut yhtä tärkeä kuin lämmönkehityksen seuraaminen kuutioita massiivisemmissä palkeissa: koekuutiot ovat pienikokoisia ja ne säilytetään koko kovettumisprosessin aikana normaalin kovettumisen komerossa (kuva 12), kun taas palkkien oli tarkoitus jäädä kovettumaan ulkoilmaan. Lisäksi niiden sisällä tapahtuva lämmönkehitys on paljon huomattavampaa. Maksimilämpötila palkkien keskellä arvioitiin nousevaksi 40 celsiusasteeseen, mutta arvion perusteella tapahtuva tutkimustoiminta ei tyydytä tutkijoiden tarpeita, joten oli välttämätöntä saada tarkempaa tietoa betonin kovettumisprosessin aikana palkkien sisällä vallitsevista lämpötiloista.



Kuva 12. Normaalin kovettumisen komero: lämpötila  $20 \pm 2$  °C ja ilman suhteellinen kosteus  $95 \pm 5$  %. Koekappaleet siirretään komerosta huoneilmaan (lämpötila  $20 \pm 5$  °C ja ilman suhteellinen kosteus vähintään 55 %) neljä tuntia ennen puristuskokeita. [14, luku 6.1]

Palkkien sisällä tapahtuvan lämmönkehityksen seuraaminen piti järjestää tämän raportin 4.2 luvun suunnitelman mukaan: neljän lämpötila-anturin avulla, joista kaksi sijoitettiin palkkien keskelle ja kaksi palkkien reunoihin. Kaikista antureista tulevat johdot liitettiin loggeriin, joka sitä ennen ohjelmoitiin testo-ohjelmalla seuraavasti:

- Mittaus sykli käynnistetään laitteesta manuaalisesti ja se on jatkuva
- Lämpötilan yksikkönä on celsiusaste
- Lämpötilatiedot jäävät loggerin muistiin joka toinen tunti, kunnes mittaus keskeytetään.



Kanavat nimettiin palkkimassojen maksimiraekoon sekä antureiden sijoituksen mukaan, esimerkiksi "10 reuna" ja "20 keski". Testo-ohjelman kautta tapahtuva loggerin säätäminen on näytetty liitteessä 1. Kun lämpötila-anturit olivat asennettu ja johdot liitetty loggeriin, palkkeihin asennettiin myös nostolenkit tulevia siirtoja varten. Lopuksi palkit peitettiin siihen tarkoitettulla suojapeitteellä ja jätettiin ne kovettumaan kuvan 13 havainnollistamassa kunnossa muottien purkuun saakka.



Kuva 13. Peittämällä juuri valettu rakenne välttyään ylimääräiseltä veden haihtumiselta betonista ja sen kautta varhaisvaiheen liialliselta kutistumalta ja halkeamilta. Palkkien reunoissa ja pohjassa veden haihtumista sekä lämmön häviämistä estävät muotit.

### 5.3 Jälkihoito ja lämmönseuranta

Muotit purettiin 26.08.2019. Veden haihtuminen betonista piti kuitenkin minimoida jatkamalla asianmukaista jälkihoitoa, joten betonipalkit käärittiin peitteisiin ja ne teipattiin kiinni. Lämmöt käytiin katsomassa muutaman päivän välein, mutta lopulliset lämmön-

kehityskäyrät nähtiin vasta silloin, kun betoni oli saavuttanut 28 vuorokauden iän ja loggeri irrotettiin lämpötila-antureista.

Loggerista jälkikäteen saatujen lämpötilatietojen mukaan betonin lämpötila lujuudenkehityksen aikana oli samaa suuruusluokkaa niin palkkien reunoissa kuin keskelläkin. Ennakoitu maksimilämpötila 40 °C ei kuitenkaan toteutunut: betonista A valetun palkin keskellä suurin mitattu lämpötila oli 35,7 °C ja betonista B valetun palkin keskellä 33,0 °C. Lämmönkehityskäyrät ovat liitteessä 2, ja niistä näkyy, että palkkien keskellä ja reunoissa lämpötilaerot eivät olleet tarpeeksi suuria aiheuttaakseen halkeilua tai suurta hajontaa valettujen koekappaleiden eri kohdista saataviin lujuustuloksiin. Näiden lämpötilatietojen perusteella palkeissa oleva betoni oletettiin tasalaatuiseksi.

#### 5.4 Lujuuskokeiden suunnittelu

Betonin lujuusominaisuuksia tutkitaan 28 vuorokauden iässä. Koekappaleet valettiin 23.08.2019, joten lujuuskokeet piti tehdä 20.09.2019.

Suoritettavien lujuuskokeiden piti havainnollistaa, kuinka erilaisilla lujuuskoemenetelmillä saadut kovettuneen betonin lujuuslukemat kuutiolujuudeksi muunnettuna poikkeavat toisistaan, jos poikkeavat. Kokeiden määrä ja tuloksien vastaavuuslaskelmat suunniteltiin Venäjän standardeihin perustuen, ja koepäivän suunnitelma jokaista betonilaatua kohti muodostui seuraavaksi:

- Rakenteista porattujen koekappaleiden testaus: 2 koekappaleen puristuslujuuden keskiarvo; koekappaleet voidaan valmistaa samasta kohdasta poratusta näytteestä
- Esivalmistettujen koekappaleiden testaus: 2 koekuution puristuslujuuden keskiarvo
- Ulosvetokoe: 12 koetuloksen keskiarvo
- Ultraäänikoe: 12 koetuloksen keskiarvo.

Sekä ulosvetokoe- että ultraäänikoetapauksessa standardien mukaan riittäisi vain yksi tulos: valetut koepalkit ovat pituudeltaan 2,4 metriä ja standardi vaatii vain yhden testin neljää palkkimetriä kohti. Syynä siihen, että lujuuden määrittämiseen suunniteltiin 12 tulosta, on vastaavuuden määrittäminen: ultraäänen etenemisnopeuden ja ulosvetokokeen avulla määritetyn betonin toteutuneen puristuslujuuden vastaavuus lasketaan

vähintään kahdestatoista tuloksesta. Testauskohtien määräksi päätettiin ottaa 15, joista ennen vastaavuuden laskemista poistetaan enintään kolme tulosta, jos tulosjoukosta löytyy epäilyttäviä arvoja. Huomion arvoista on se, että EN-standardien mukaan ulosvetokokeiden tuloksien käyttöä varten täytyy muodostaa ulosvetovoiman vastaavuussuhde rakenteen betonin puristuslujuuteen, joka puolestaan selvitetään poranäytteiden avulla, kun taas Venäjän standardit sallivat ulosvetokokeiden tuloksien käytön vastaavuussuhteen rakentamiseen muihin epäsuoriin menetelmiin – tässä tapauksessa ultraäänikokeisiin. Ultraäänen etenemisnopeuden vastaavuussuhde voitaisiin muodostaa myös muihin tuloksiin perustuen eli esimerkiksi esivalmistettujen koekuutioiden puristuslujuustuloksiin tai samoista testauspaikoista porattujen koekappaleiden puristuslujuuksiin, mutta nämä vaihtoehdot suljettiin pois siitä syystä, että työmailla ultraäänen vastaavuussuhde määritetään useimmiten nimenomaan ulosvetokokeiden tuloksiin perustuen. Työmailla tapahtuvassa laadunvalvonnassa 12 tuloksesta muodostettua vastaavuussuhdetta myös ajankohtaistetaan säännöllisesti vähintään kerran kuukaudessa. Ajankohtaistaminen tapahtuu korvaamalla vastaavuustaulukon tulospareja uusilla, joita jokaisen ajankohtaistamisen yhteydessä on oltava vähintään kolme.

## 5.5 Kokeiden suorittaminen

Tässä luvussa raportoidaan vain kokeiden suoritusprosessista ja sen aikana ilmenneistä asioista. Koetuloksien muuntaminen 150 mm kuutiolujuudeksi Venäjän standardien mukaan sekä saatujen lukemien analyysi selostetaan luvuissa 6 ja 7.

### 5.5.1 Rakenteesta poratut koekappaleet

Rakenteista porattujen koekappaleiden tapahtuvaa betonin puristuslujuuden määrittämistä säätelee standardi GOST 28570-2019, jonka asettamia vaatimuksia rakenteesta poratuille koekappaleille selostettiin tämän raportin luvussa 3.2. Saman standardin mukaan siinä tilassa, jossa suoritetaan puristuskokeet, ilman lämpötilan on oltava  $20 \pm 5$  °C ja ilman suhteellisen kosteuden vähintään 55 %. Jos rakennekoekappaleiden valmistukseen on käytetty timanttiporausta tai -leikkausta, jonka aikana teriä kasteltiin vedellä, näytteet sijoitetaan koetilaan vähintään kolmeksi vuorokaudeksi ennen kokeiden suorittamista. Tämän tutkimuksen tapauksessa se tarkoitti, että poranäytteet piti ottaa viimeistään 17.09.2019 ja viedä ne samana päivänä laboratorioon, jossa ne myöhemmin puristetaan.



Poranäytteet otettiin 17.09.2019 aamulla. Timanttiporan koko valittiin sen perusteella, että tuloksien jatkokäsittelyyn vaikuttaisi mahdollisimman vähän standardien määäämiä kertoimia. Edellä mainittu GOST määrittelee rakenteesta poratun koekappaleen kuutiolujuuden  $R$  kaavalla

$$R = R_{koe} \alpha \eta_1 ,$$

jossa  $R_{koe}$  on puristuslujuuskokeesta saatu tulos ja sen yksikkö on MPa. Kerroin  $\alpha$  riippuu rakenteesta poratun koelieriön halkaisijasta taulukon 6 mukaan.

Taulukko 6. Lieriömuotoisen rakennekoekappaleen ominaispuristuslujuuden muuntaminen 150 mm kuutiolujuudeksi: halkaisijasta riippuva kerroin  $\alpha$ . [10, taulukko 5]

Poralieriön halkaisija [mm]	50 ± 6	63 ± 6	80 ± 10	>90
<b>Kerroin <math>\alpha</math></b>	<b>0,85</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>1,00</b>

Kerroin  $\eta_1$  on taas koelieriön mittasuhteet (korkeuden suhde halkaisijaan) huomioiva kerroin, joka määräytyy taulukon 7 mukaan.

Taulukko 7. Poralieriön mittasuhteet huomioiva kerroin  $\eta_1$ . [10, taulukko 2, pelkistetty]

Poralieriön korkeuden suhde halkaisijaan (h/d)	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,84	0,94	1,04	1,14	1,24	1,34	1,44	1,54	1,64
<b>Kerroin <math>\eta_1</math></b>	<b>0,92</b>	<b>0,96</b>	<b>1,00</b>	<b>1,04</b>	<b>1,08</b>	<b>1,10</b>	<b>1,12</b>	<b>1,13</b>	<b>1,14</b>

Kun poralieriöiden puristuslujuustuloksiin haluttiin mahdollisimman vähän vaikuttavia tekijöitä, poralieriöiden mitat valittiin taulukoiden 6 ja 7 perusteella niin, että sekä  $\alpha$  että  $\eta_1$  olisivat 1,0. Näin ollen päädyttiin 94 millimetrin timanttiporaan ja jokainen lieriö porattiin sillä tavalla, että siitä saataisiin valmistettua kaksi koekappaletta, joiden korkeus olisi välillä 90...97 mm eli korkeuden suhde halkaisijaan pysyisi lukemissa 0,95...1,04.

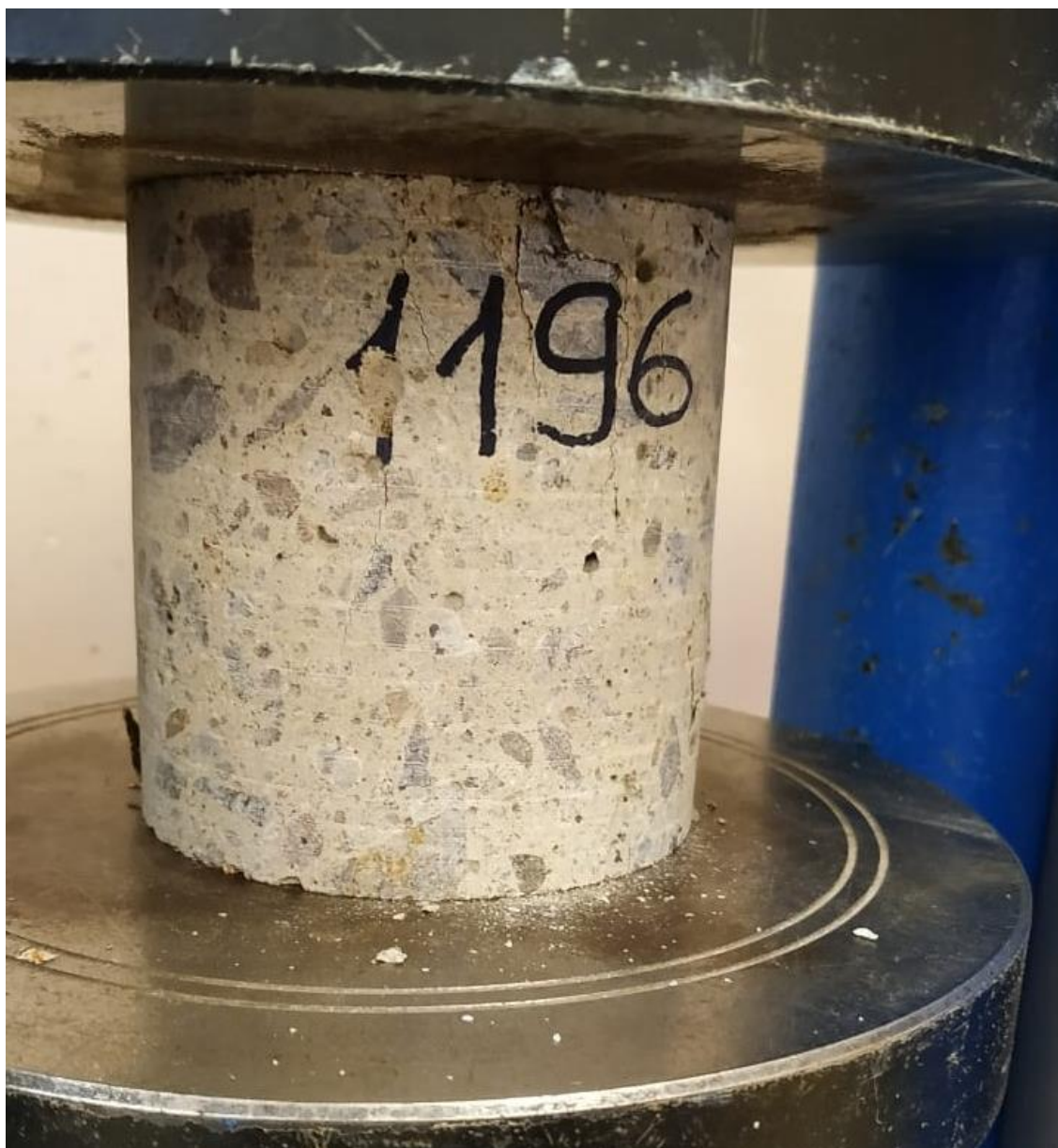
Kuten kuvasta 14 näkyy, porattujen näytteiden pinnoista ei havaittu merkittäviä puutteita, mutta kummastakin poranäytteestä löytyi pieniä koloja, joita esivalmistetuissa koekuutioissa ei yleensä esiinny. Näiden kolojen olemassaolo päätettiin jättää kuitenkin huomioimatta, koska on luonnollista, että koekuutioiden muottia vastaan muodostuneet pinnat ovat aina tasaisempia kuin poranäytteiden pinnat. Betonin tiivistyslaatu todettiin tässä tutkimuksen vaiheessa normaaliksi, mutta ei kuitenkaan esimerkilliseksi. Massan

notkeus huomioon ottaen, tiivistämisen kanssa piti noudattaa varovaisuutta, jotta massa ei erotu, ja silti pientä erottumista havaittiin poranäytteiden yläpinnoissa.



Kuva 14. Rakenteista juuri poratut ja merkatut näytteet. Oikealla on poranäyte betonista A ja vasemmalla betonista B.

Poranäytteet merkattiin samoilla tunnuksilla kuin samasta massasta valmistetut koekuutiotkin ja vietiin ne laboratorioon, missä insinööri valmisti niistä koekappaleet ja testasi ne (kuva 15). Poranäytteet täytyi viedä erilliseen laboratorioon siitä syystä, että tehtaalla ei ollut kyseisellä hetkellä käytössä poranäytteiden päitä katkaisevaa standardien mukaista laitetta. Laboratorion kanssa sovittiin, että tulospapereissa selostetaan koekappaleiden lopulliset mitat leikkauksen jälkeen sekä koekappaleet rikkoneen voiman suuruus. Muita tietoja kyseiseltä laboratoriolta ei tarvittu.



Kuva 15. Puristimessa juuri murtunut, poranäytteestä leikattu koekappale.

### 5.5.2 Esivalmistettujen koekappaleiden puristuskokeet

Ennen koekappaleiden testaamista puristimessa ne punnittiin ja mitattiin. Vaikka koekuutiomuotit ovat mitoiltaan tasan 100 mm, koekuution mitta pohjasta pintaan jää aina koekuutioita valmistavan henkilön vastuuksi. Yhdenkin millimetrin ero tarkoittaa, että puristuspinnasta tulee 1 %:n verran pienempi, ja puristuskoneen antamaa tulosta onkin silloin muunnettava vastaamaan toteutunutta puristuspinta-alaa. Punnituksella taas varmistutaan, että koekappaleen tiheys on vastaavien betonilaatujen kanssa samaa suuruusluokkaa eikä siinä ole merkittäviä poikkeavuuksia.

### 5.5.3 Ultraäänen etenemisnopeuden mittaaminen ja ulosvetokokeet

Ennen mittauksia koepalkkeihin merkattiin noin 15 cm säteeltään olevat testauspaikat ja numeroitiin ne. Jokaisen testauspaikan kohdalla testauslaitetta käytettiin 15 kertaa, minkä jälkeen laite laski kyseiseltä paikalta mitattujen etenemisnopeuksien keskiarvon. Sen jälkeen siirryttiin toiseen testauspaikkaan ja toistettiin samat toimenpiteet. Käytetty ultraäänen etenemisnopeuden mittauslaite näkyy kuvassa 16.





Kuva 16. Ultraäänen etenemisnopeuden mittaus tapahtuu kahden metallisarven avulla, joista toinen lähettää ultraääniaallon ja toinen ottaa sen vastaan.

Saadut ultraäänen etenemisnopeudet jokaisen testauspaikan kohdalla merkittiin muistiin ja luotiin taulukko, jossa jokaisen ultraäänituloksen viereen kirjoitettiin ulosvetokokeen antamat tulokset.

Kuten luvussa 3.5 jo selostettiin, Venäjän standardit sallivat 16 x 35 mm:n ankkureiden käytön 40...100 MPa:n betoneissa ja 24 x 48 mm:n ankkureita käytetään 5...100 MPa:n betoneissa. Näin ollen betoni B:n tapauksessa oli selvää, että täytyy käyttää 24-millistä ankkuria, mutta betoni A:n oletettiin varmasti saavutettavan yli 40 MPa:n puristuslujuuden, joten päädyttiin käyttämään siitä valetussa palkissa 16-millistä ankkuria. Ulosvetokokeen tulokset kirjoitettiin muistiin ultraäänen etenemisnopeuden tuloksien viereen ja saatiin näin kaksi taulukkoa: kummallekin palkille oma, ja joka taulukossa 15 tulosparia.

## 6 Lujuuskoetuloksien yhdenmukaistaminen

### 6.1 Rakenteesta poratut koekappaleet

Koepäivänä ulkopuolisesta laboratoriosta saatiin taulukoiden 3 ja 4 sisältämät tiedot:

Taulukko 8. Betonin A (näyte 1194) poranäytteestä valmistettujen koekappaleiden mitat ja puristuskokeiden tulokset.

	Halkaisija D [mm]	Korkeus H [mm]	Massa [g]	$F_{\max}$ [kN]
Koekappale 1194-1	93,23	97,33	1511	267,45
Koekappale 1194-2	93,25	97,45	1507	200,72

Taulukko 9. Betonin B (näyte 1196) poranäytteestä valmistettujen koekappaleiden mitat ja puristuskokeiden tulokset.

	Halkaisija D [mm]	Korkeus H [mm]	Massa [g]	$F_{\max}$ [kN]
Koekappale 1196-1	93,27	97,75	1536	268,17
Koekappale 1196-2	93,42	96,51	1505	273,26

Tähän päättyi ulkopuolisen laboratorion tehtävä. Ennen kaikkea tarkistettiin koekappaleiden tiheydet jakamalla lieriöiden tilavuudet niiden massoilla. Mitään merkittäviä poikkeamia ei ilmennyt: kummankin betonin koekappaleiden tiheyksien välinen ero jäi alle 1 %:n. Tiheysarvoja verrattiin myös vastaavien massojen tiheyksiin ja todettiin, että merkittäviä eroja tai poikkeamia ei testattavien betonien kohdalla esiinny.

Seuraavaksi oli laskettava puristuspaine, jolla koekappaleet murtuivat eli niiden ominaispuristuslujuus  $R_{koe}$ . Se laskettiin jakamalla koekappaleen rikkonut voima  $F_{\max}$  puristuspinta-alalla  $A$ :

$$R_{koe} = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{(D/2)^2 \times \pi}$$

ja lisättiin lukemat tulostaulukkoon. Seuraavaksi siirryttiin tuloksien muuntamiseen standardin mukaiseen 150 mm kuutiolujuuteen R kaavalla

$$R = R_{koe} \alpha \eta_1$$

Laboratorio ei päässyt luvussa 5.5.1 suunniteltuihin mittoihin: tarkoitus oli saada jokaisen koekappaleen korkeuden suhde sen halkaisijaan pysymään lukemissa 0,95...1,04, mutta koekappaleiden 1194-2 ja 1196-1 kohdalla tämä ehto ei toteutunut. Tästä syystä jouduttiin kertomaan kyseisten koekappaleiden ominaispuristuslujuus kertoimella  $\eta_1 = 1,04$ , jonka arvo tarkistettiin standardin GOST 28570-2019 taulukosta 2 (tämän raportin taulukko 7). Koekappaleiden 1194-1 ja 1196-2 kohdalla kyseinen kerroin jäi olemaan 1,0. Koekappaleen halkaisijaa huomioiva kerroin  $\alpha$  (tämän raportin taulukko 6) pysyi puolestaan suunnitellussa arvossa 1,0: poranäytteet toteutettiin 94 mm:n timanttiporalla kuten suunniteltiinkin. Kertoimien avulla muunnetut arvot muodostuivat viralliseksi 150 mm kuutiopuristuslujuudeksi. Niistä laskettiin keskiarvot kummankin betonin kohdalla ja poranäytteiden tuloksien yhteenveto dokumentoitiin taulukkoon 10.

Taulukko 10. Rakennekoekappaleiden mittaus- ja koetuloksista laskettu betonin tiheys, ominaispuristuslujuus, muunnos kuutiopuristuslujuudeksi ja lopulliset tulokset.

	Koe-kappale	Halkaisija D [mm]	Korkeus H [mm]	Mittasuhte H/D	Massa [g]	Murtovoima $F_{max}$ [kN]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Ominaispuristuslujuus $R_{koe}$ [MPa]	$\eta_1^*$	$\alpha^{**}$	Kuutiopuristuslujuus R [MPa]	TULOS [MPa]
Betoni A	1194-1	93,23	97,33	1,0440	1511	267,45	2274	39,18	1,00	1,00	39,18	34,28
	1194-2	93,25	97,45	1,0450	1507	200,72	2264	29,39	1,00	1,00	29,39	
Betoni B	1196-1	93,27	97,75	1,0480	1536	268,17	2300	39,25	1,00	1,00	39,25	39,56
	1196-2	93,42	96,51	1,0331	1505	273,26	2275	39,87	1,00	1,00	39,87	

\*Ieriömuotoisen koekappaleen mittasuhteet H/D huomioiva kerroin [GOST 28570-2019, taulukko 2]

\*\*Ieriömuotoisen koekappaleen halkaisijasta riippuva kerroin [GOST 28570-2019, taulukko 5]

Saatuihin tuloksiin tuli kommentoitavaa heti, mutta standardien mukainen toiminta ei edellytä syvällisempää analyysiä. Se päätettiin tehdä silloin, kun kaikki muillakin koemenetelmillä saadut tulokset ollaan saatu muunnettua 150 mm kuutiolujuudeksi noudattamalla kaikkia standardien asettamia vaatimuksia.



## 6.2 Esivalmistetut koekappaleet

Seuraavaksi vuorossa olivat esivalmistettujen koekuutioiden tulokset. Kuutioiden toteutuneet koot sekä kuutiot murtaneen voiman lukemat sijoitettiin vastaavaan taulukkoon ja tarkistettiin koekuution koot huomioiva kerroin: standardien mukaan muiden kuin 150 mm:n koekuutioiden lukemat täytyy kertoa kertoimella  $\alpha$ , joka 100 mm kuutioiden tapauksessa on 0,95 [14, taulukko 4]. Esimerkki tämän kertoimen käytöstä Suomessa ja Venäjällä on tämän raportin taulukossa 4. Koekuutiutuloksista muodostunut yhteenveto on taulukossa 11.

Taulukko 11. Koekuutioiden perusteella määritetty betonien A ja B 150 mm kuutiopuristuslujuus.

	Koe- kuutio	Särmä 1 [mm]	Särmä 2 [mm]	Särmä 3 [mm]	Massa [g]	Murto- voima $F_{\max}$ [kN]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Ominais- puristuslujuus $R_{\text{koe}}$ [MPa]	$\alpha^*$	Kuutio- puristuslujuus R [MPa]	TULOS [MPa]
Betoni A	1194	100	100	99	2261	496,40	2284	50,14	0,95	47,63	46,47
	1194	100	100	99	2266	472,20	2289	47,70	0,95	45,31	
Betoni B	1196	100	100	99	2307	442,50	2330	44,70	0,95	42,46	41,86
	1196	100	100	99	2324	430,00	2347	43,43	0,95	41,26	

\*koekuution koosta riippuva kerroin [GOST 10180-2012, taulukko 4]

Taulukosta näkyy, että koekuutioiden massojen perusteella laskettu tiheys ei poikkea tavanomaisesta vastaavien betonien tiheydestä. Jokainen koekuutio tuli hieman pienikokoiseksi, mutta ominaispuristuslujuutta laskiessa 99-millimetriseksi tulleet särmät huomioitiin puristuspinta-alan kaavassa.

## 6.3 Ultraäänen etenemisnopeudet ja ulosvetokokeiden tulokset

Ultraäänen etenemisnopeuden ja ulosvetokokeiden tuloksia tuli käsitellä samaan aikaan. Joka palkista saatiin 15 tulosparia: ensin testauskohdista mitattiin ultraäänen etenemisnopeus ja sitten samasta kohdasta tehtiin ulosvetokoe siihen tarkoitettulla laitteella. Sen jälkeen tuloksille piti muodostaa vastaavuus eli niin sanottu korrelaatiofunktio, joka kuvaisi ulosvetokokeella saatujen lujuustuloksien vastaavuutta ultraäänen etenemisnopeuteen. EN-standardeissa ultraäänen etenemisnopeuden ja rakenteesta porattujen koekappaleiden puristuslujuuden vastaavuus määritetään niin, että käytetään

standardin mukaista ultraäänen etenemisnopeuden mittauksen peruskäyrää, jolle testituloksien perusteella lasketaan siirtymä. Peruskäyrä löytyy standardista SFS-EN 13791-2007 ja ultraäänen tapauksessa se on toisen asteen funktion kasvava osuus, tai tarkemmin sanottuna positiivisen paraabelin oikea puolisko. [8, luku 8.3.]

Venäjällä ultraäänen ja ulosvetokokeiden vastaavuutta kuvataan ensimmäisen asteen funktiolla. Vastaavuusfunktiota määritettäessä käytetään yhtälöä

$$R = aV + b, \quad (1)$$

jossa

R on vastaavuuden perusteella määritettävä betonin puristuslujuus ja  
V on ultraäänen etenemisnopeus.

Yhtälön 1 kertoimet a ja b lasketaan tilastomatematiikan avulla. Kun tiedetään, että ultraäänen etenemisnopeus tietyssä betonissa on sitä suurempi, mitä suurempi on kyseisen betonin puristuslujuus, voidaan olettaa, että kerroin a on aina positiivinen ja vastaavuusfunktion kuvaaja on nouseva suora. Kertoimen a kaava on seuraava:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N [(R_{i,koe} - \bar{R}_{koe})(V_i - \bar{V})]}{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \quad (2)$$

N on testauskohtien lukumäärä  
R<sub>i,koe</sub> on ulosvetovoimakokeen tulos kohdalla i  
V<sub>i</sub> on ultraäänen etenemisnopeus kohdalla i.

Kerroin b kuvaa puolestaan suoran siirtymää ja se lasketaan kaavasta 3, jonka muuttujamerkintöjä on selostettu yhtälön 1 yhteydessä.

$$b = \bar{R}_{koe} - a\bar{V} \quad (3)$$

Sen jälkeen, kun vastaavuusfunktion kertoimet a ja b ovat tiedossa ja vastaavuusfunktio on siten määritetty, siirrytään tuloksien suodatukseen. Ensin lasketaan ultraäänen etenemisnopeutta vastaavat lujuudet saadun vastaavuusfunktion avulla. Standardin mukaan on suodatettava pois kaikki ne epäsuoran menetelmän (tässä tapauksessa ultraäänen etenemisnopeuden) perusteella lasketut lujuudet, jotka eivät täytä ehtoa

$$\frac{|R_{i,ultra}-R_{i,koe}|}{S} \leq 2, \quad (4)$$

jossa

$R_{i,ultra}$  on ultraäänen etenemisnopeudesta vastaavuusfunktion avulla laskettu betonin puristuslujuus kohdalla  $i$ ,  
 $R_{i,koe}$  on ulosvetovoimakokeen tulos kohdalla  $i$  ja  
 $S$  on otoshajonta eli keskihajonnan harhaton estimaatti.

Kaavassa 4 käytettävä otoshajonta  $S$  lasketaan kaavalla 5, jossa käytetään samoja muuttujia kuin edellisissäkin kaavoissa ja yhtälöissä.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{i,koe} - \bar{R}_{i,ultra})^2}{N-2}} \quad (5)$$

Suodatuksen jälkeen vastaavuusfunktio lasketaan uudestaan ja se on lopullinen. Funktion käytölle on kuitenkin olemassa myös muita rajoituksia, joita ovat:

- Saatua vastaavuusfunktia voidaan käyttää vain niille tulevaisuudessa mitattaville ultraäänen etenemisnopeuksille, jotka osuvat välille  $V_{\min} \dots V_{\max}$  vastaavuusfunktion määrittämiseen käytetyistä arvoista.
- Jos funktion otoskorrelaatio  $r$  (kaava 6) on pienempi kuin 0,7, saatua vastaavuusfunktia ei voida käyttää betonin puristuslujuuden määrittämiseen.
- Saatua vastaavuusfunktia ei saa käyttää, jos otoshajonnan  $S$  suhde ulosvetokokein määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvoon  $\bar{R}_{koe}$  on suurempi kuin 0,15.

Edellä mainittu otoskorrelaatio  $r$  lasketaan kaavasta 6, jossa käytettäviä muuttujamerkintöjä selostettiin edellisissä kaavoissa ja yhtälöissä.

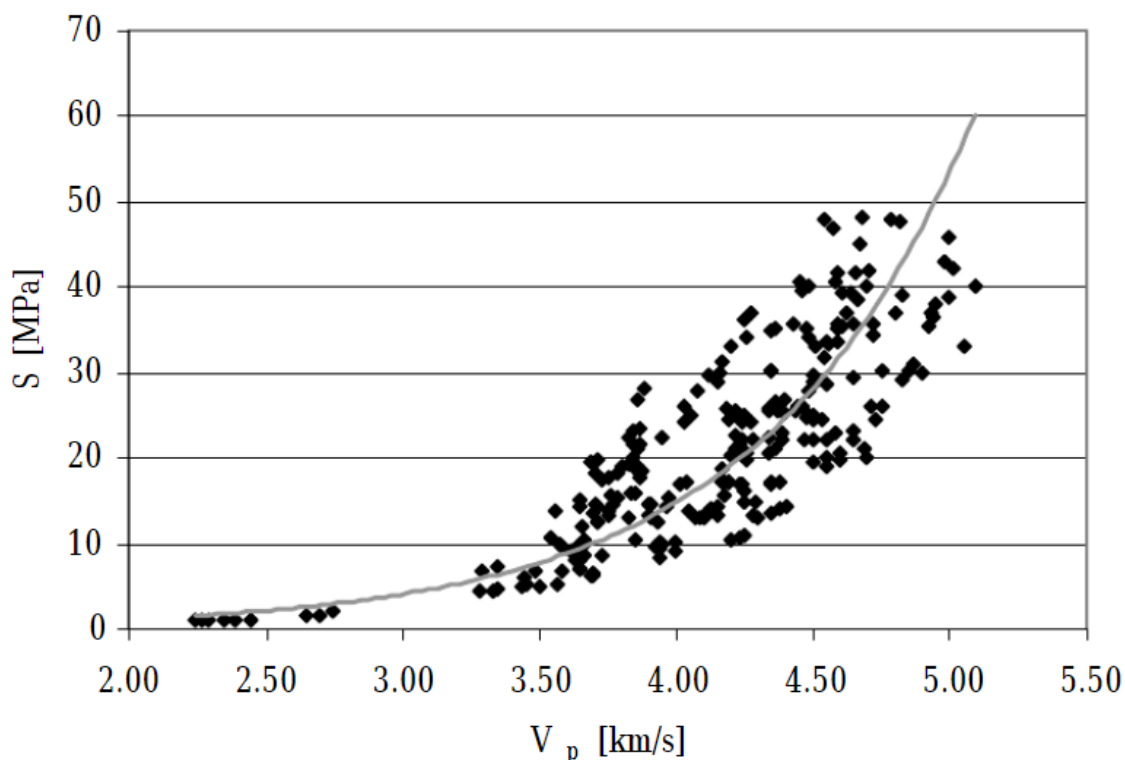
$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(V_i - \bar{V})(R_{i,koe} - \bar{R}_{koe})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{i,koe} - \bar{R}_{koe})^2}} \quad (6)$$

Otoskorrelaation  $r$  arvo tilastomatematiikassa on aina välillä  $-1 \dots 1$  ja se kertoo, ovatko kaksi satunnaismuuttujaa kahdesta eri otoksesta lineaarisesti riippuvaisia toisistaan, kuinka tarkka niiden välinen riippuvuus on ja ovatko ne suoraan vai käänteisesti verrannollisia. Verrannollisuus tulee ilmi otoskorrelaation etumerkistä: positiivinen otoskorrelaation arvo tarkoittaa, että satunnaismuuttujat ovat suoraan verrannollisia, ja negatiiv-

vinen arvo kertoo käänteisverrannollisuudesta. Mitä lähempänä nollaa on otoskorrelaatio, sitä pienemmällä varmuudella voidaan olettaa, että satunnaismuuttujien välillä on lineaarinen riippuvuus. Toisaalta, otoskorrelaation itseisarvon ollessa lähellä arvoa 1, satunnaismuuttujien riippuvuus toisistaan on erittäin lähellä lineaarista riippuvuutta.

Otoskorrelaatiota on syytä käyttää silloin, kun ei voida analysoida koko aineistoa, vaan käytössä on kaksi otosta kahdesta eri aineistosta ja aineistot ovat normaalisti jakautuneita. Betonin puristuslujuutuloksien ja ultraäänen etenemisnopeuksien voidaan olettaa noudattavan normaalijakautumaa. Kun koko aineistona pidetään loputonta testimäärää, tulosparit tulevat aina olemaan vain rajallinen otos kyseisestä aineistosta, vaikka niitä olisi erittäin paljon.

Venäjän standardit sallivat niiden vastaavuuksien käytön, joiden otoskorrelaatio on suurempi kuin 0,7 eli lineaarinen riippuvuus on hyvin todennäköistä, mutta ei kuitenkaan erittäin tarkkaa. Tarkkuusvajeen korvaa se, että standardi rajoittaa saadun vastaavuusfunktion käytön mahdollisuuksia epäsuoran menetelmän alkuperäisotoksen minimi- ja maksimiarvojen väliin. Kun asiaa ajatellaan matemaattisesti, voitaisiin olettaa, että otoskorrelaation ollessa yli 0,95 sitä voitaisiin käyttää mille tahansa ultraääninopeuksille, mutta suuret betonialan tilastot osoittavat, että isossa mittakaavassa ultraäänen etenemisnopeuden ja betonin puristuslujuuden välillä ei olekaan lineaarista riippuvuutta, vaan se muistuttaa enemmän positiivisen paraabelin oikeaa puoliskoa tai eksponenttifunktion kuvaajaa. Kyseinen riippuvuus havainnollistuu hyvin kuvassa 17 olevasta kuvaajasta, joka on rakennettu suuremman otoksen perusteella.

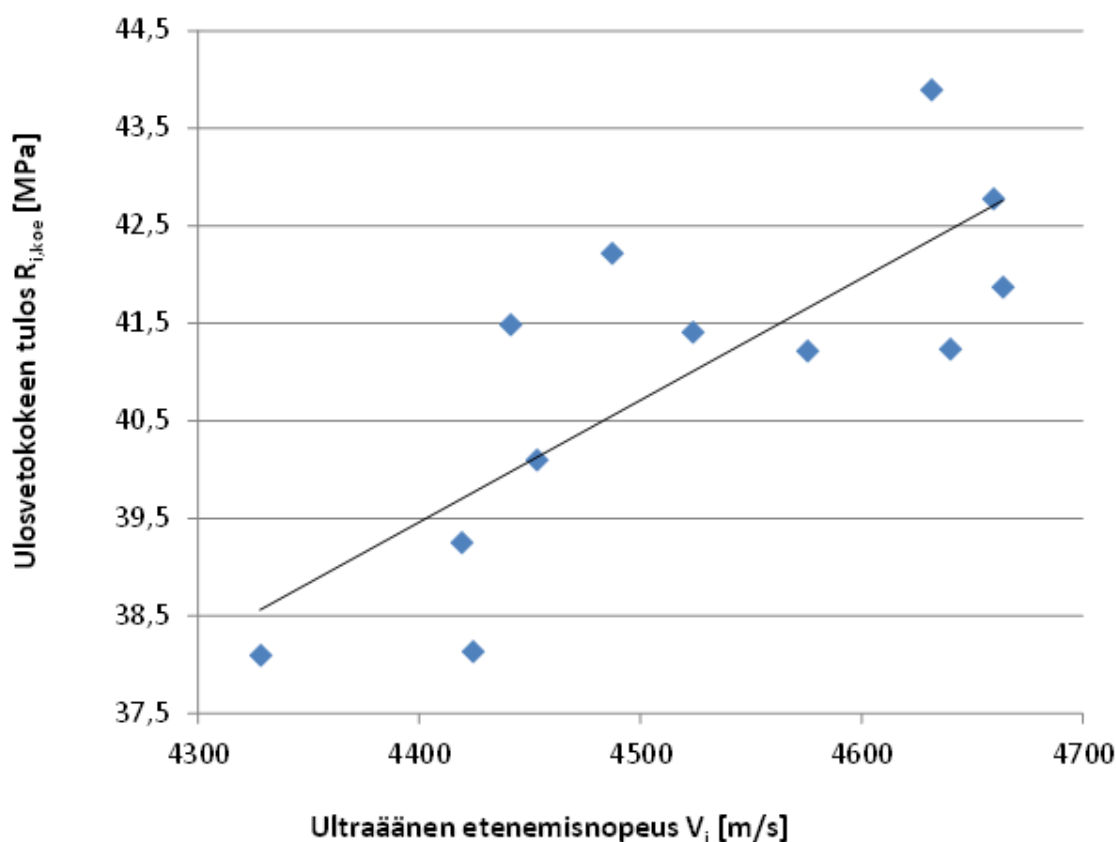


Kuva 17. Betonin puristuslujuuden ja ultraäänen etenemisnopeuden vastaavuusfunktio. Kun käytössä on suuri määrä tulospareja, betonin puristuslujuuden ja samassa betonissa kulkevan ultraäänen etenemisnopeuden välistä riippuvuutta kuvaa parhaiten eksponenttifunktion kuvaaja, jonka otoskorrelaatio on tässä tapauksessa 0,803 eli sitä voidaan pitää melko luotettavana. [15, kuva 2.]

Euroopassa standardit ottavat huomioon kuvaajan muodon käyttämällä peruskäyränä toisen asteen funktiota, kun taas Venäjän standardit käyttävät lineaarista riippuvuutta, jonka voidaan olettaa toimivan suhteellisen pienillä funktion väleillä. Tästä syystä Venäjän standardi rajoittaa saadun funktion käytön siihen väliin, jonka epäsuoran menetelmän mittaustulokset kattavat eli ultraäänen tapauksessa useimmiten 4400...4700 m/s, kun taas eurooppalaisten standardien mukaan niissä annettua paraabelin muotoista peruskäyrää voidaan käyttää välillä 4000...4800 m/s.

Venäjän standardien mukaan, mikäli vastaavuusfunktion rakentaminen ei onnistu niin, että funktio täyttää standardin asettamat vaatimukset, tehdään lisää kokeita ja funktio rakennetaan uudestaan uusilla tulospareilla. Tässä tutkimuksessa vastaavuusfunktion määrittämistä varten mitään ei laskettu käsin, vaan kaikki kaavat sijoitettiin taulukkotiedostoon, joka laski tarvittavat luvut automaattisesti. Samalla luotiin myös eri menetelmillä toteutettujen kokeiden tuloksia havainnollistava pistediagrammi. Käytännössä kyseisen diagrammin pisteiden vieressä kulkeva approksimoitu suora eli trendi onkin

vastaavuusfunktion kuvaaja tutkittavalla arvovälillä. Betonin A mittaustulospareista rakennettu pistediagrammi on kuvassa 18.



Kuva 18. Betonin A testauskohtien tulospareista rakennettu suureiden riippuvuutta havainnollistava pistediagrammi ja trendikäyrä. Saadun vastaavuusfunktion otoskorrelaatio on 0,789, eli sitä voidaan pitää melko luotettavana.

Kuvan 18 diagrammin muodostaneista tulospareista on jo karsittu pois ne kolme tulosta, joiden kohdalla mittaukset antoivat ristiriitaisimpia tuloksia eli sellaisia, joissa ultraäänien etenemisnopeudella oli kasvusuunta ja ulosvetokokeen tulos näytti puolestaan pienempiä arvoja. Vastaavuusfunktion rakentaminen toteutettiin taulukkotiedoston avulla. Sen jälkeen, kun vastaavuusfunktio oli muodostettu, jokaiselle testauskohdalle laskettiin ultraäänien perusteella määritetty puristuslujuus. Ennen kuin vastaavuusfunktio päätettiin lopulliseksi, piti tarkistaa, että kaikkien tulosparien kohdalla toteutuu standardin ehto, jonka mukaan ultraäänien etenemisnopeudesta määritetyn ja ulosvetokokeella mitatun puristuslujuuksien erotuksen itseisarvon suhde otoshajontaan tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 2. Ehto toteutui joka tulosparin kohdalla, joten tulossuodatusta ei tarvinnut tehdä ja vastaavuusfunktio voitiin hyväksyä kuvaamaan tuloksien lineaarisesta riippuvuudesta. Ennen kuin funktiota voitaisiin käyttää, piti vielä tarkistaa sen käyttökel-

poisuus standardien mukaan. Saadun funktion otoskorrelaatio  $r$  tuli standardin vaatimusten mukaiseksi  $> 0,7$  ja otoshajonnan  $S$  suhde puristuslujuuksien keskiarvoon alle  $0,15$ . Taulukkoon 12 on koottu yhteenveto betonin A tuloksista.

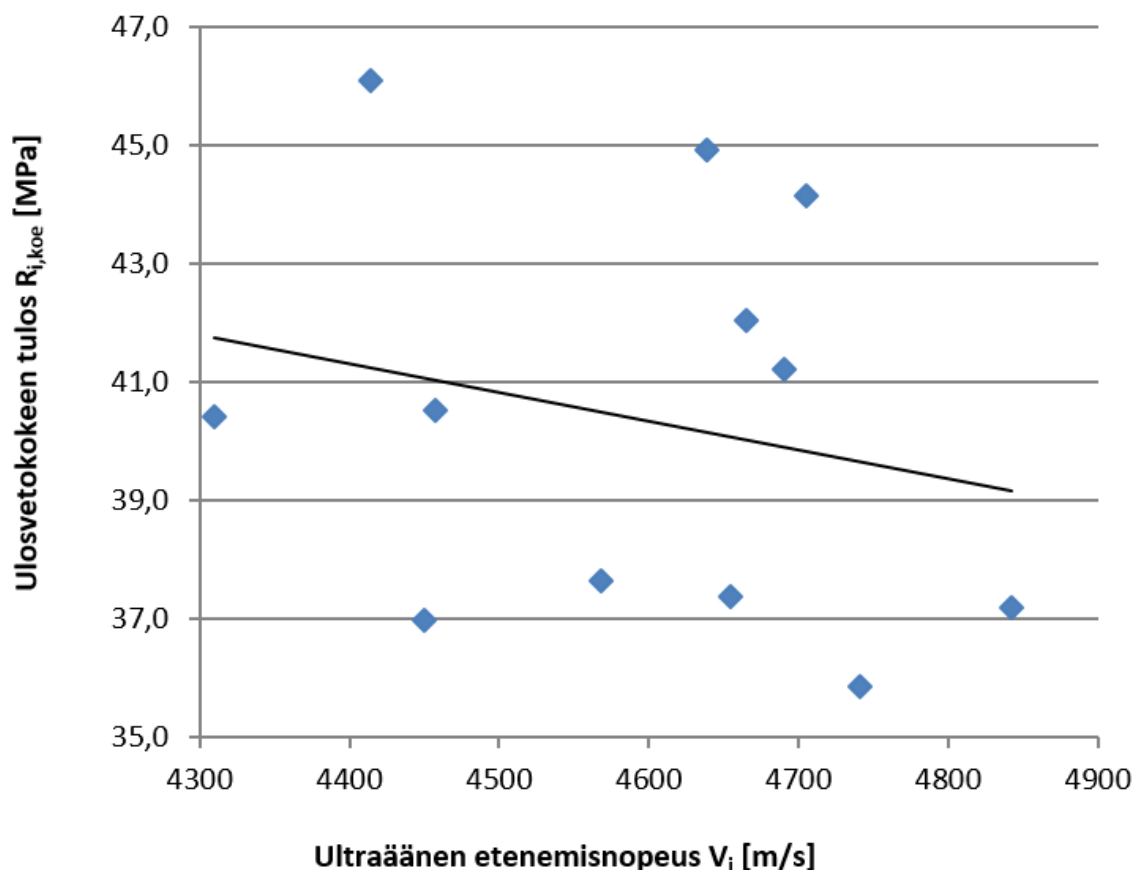
Taulukko 12. Betonin A tulokset. Vasemmalla: ultraäänen mitatut etenemisnopeudet ja samoista testauskohdista saadut ulosvetokoetulokset. Keskellä ylempänä: vastaavuusfunktion kertoimien laskenta ja lopullinen vastaavuusfunktio. Oikealla: ultraäänen etenemisnopeuden ja vastaavuusfunktion perusteella lasketut puristuslujuudet. Keskellä alempana: standardien mukainen vastaavuusfunktion käyttökelpoisuuden tarkistus.

testaus- kohta	$V_i$ [m/s]	$R_{i,koe}$ [MPa]	VASTAAVUUSFUNKTION LASKENTA:		Ulosvetokokeen ja ultraäänien etenemisnopeuden vastaavuusfunktion avulla määritetty betonin puristuslujuus testauskohdalla	$R_{i,ultra}$ [MPa]	
1	4328	38,1	kerroin a:	0,0125		38,6	
2	4419	39,3	muuttuja b:	-15,516		39,7	
3	4424	38,1	vastaavuusfunktio:	$R = 0,0125 * V_i - 15,516$		39,8	
4	4441	41,5	STANDARDIN EHTOJEN TÄYTTYMINEN:			40,0	
5	4453	40,1	vastaavuusfunktion otoskorrelaatio $r > 0,7$ :			40,1	
6	4487	42,2				40,6	
7	4524	41,4	otoshajonnan suhde ulosvetokoe- tuloksien keskiarvoon $S/R_{koe} < 0,15$ :			41,0	
8	4576	41,2				41,7	
9	4632	43,9	0,789			42,4	
10	4640	41,2				42,5	
11	4660	42,8				42,7	
12	4664	41,9				42,8	
keski- arvo	4521	41,0	0,028		keski- arvo	41,0	

Saatu vastaavuusfunktio todettiin käyttökelpoiseksi tulevaisuudessa samasta betonista valituissa rakenteissa sillä ehdolla, että funktiota voidaan käyttää ultraäänen mitatun etenemisnopeuden osuessa välillä 4328...4664 m/s (taulukon 12 toisen sarakkeen minimi- ja maksimiarvot).

Kun betonin A tulosparien käsittely oli valmis, siirryttiin käsittelemään betonin B tulospareja. Kaksi tulosparia jouduttiin sulkemaan tutkimuksesta pois jo ennen tulosparien varsinaista käsittelyä, koska näillä testauskohdilla ulosvetokokeen aikana irronnut betonikappale ei täyttänyt standardin vaatimusta, jonka mukaan suurin mitattu irtoutumissäde ei saa olla suurempi kuin kaksinkertainen pienin mitattu irtoutumissäde [12, luku 7.6.4]. Jäljelle jääneet kolmetoista tulosta syötettiin taulukkotiedostoon, joka piirsi betonin B testauskohtien diagrammin (kuva 19).





Kuva 19. Betonin B testauskohtien tuloksista rakennettu pistediagrammi ja trendikäyrä. Saadun vastaavuusfunktion otoskorrelaatio on -0,269 eli vastaavuuden muodostaminen on täysin epäonnistunut sekä luotettavuuden että suureiden verrannollisuuden osalta.

Jo trendikäyrästä nähtiin, että joku asia oli mennyt pieleen: betonin lujuus on normaalisti sitä suurempaa, mitä nopeammin ultraääni pääsee kulkemaan samassa betonissa, kun taas saatujen tuloksien trendikäyrä näyttää, että asia on päinvastoin. Vastaavuusfunktio kuitenkin laskettiin ja tulosparien sopivuus tarkistettiin, mistä syntyi taulukko 13. Tulospareissa ei ollut yhtään pois suodatettavaa tulosta, mutta funktion otoskorrelaatio  $r$  jäi reilusti alle vaaditun arvon 0,7 (korostettu taulukossa 13 keltaisella) ja viittasi etumerkillään siihen, että tässä tapauksessa betonin puristuslujuus ja ultraäänen etenemisnopeus ovat käänteisverrannollisia suureita. Samalla otoskorrelaatio oli hyvin lähellä nollaa, mikä puolestaan kertoi siitä, että kyseisen vastaavuusfunktion luotettavuus on erittäin pieni. Näin ollen betonin B ultraäänitulokset jätettiin tutkimuksessa huomioimatta ja yliivattiin, koska niiden kautta saatuja betonin puristuslujuusarvoja ei voitu pitää luotettavina lainkaan eikä rakennettua vastaavuusfunktiota voida käyttää betonin puristuslujuuden arviointiin – ei standardien eikä logiikan mukaan.

Taulukko 13. Betonin B tulokset. Epäonnistunut vastaavuusfunktion määrittäminen: saadun funktion tilastollisen analyysin perusteella betonin puristuslujuus ja ultraäänen etenemisnopeus ovat käänteisverrannollisia. Tulokset eivät täytä vaatimuksia eivätkä noudata logiikkaa.

testaus- kohta	$V_i$ [m/s]	$R_{i,koe}$ [MPa]	VASTAAVUUSFUNKTION LASKENTA:		Ulosvetokokeen ja ultraäänen etenemisnopeuden vastaavuusfunktion avulla määritetty betonin puristuslujuus testauskohdalla	$R_{i,ultra}$ [MPa]	
1	4310	40,9	kerroin a:	-0,0066		41,8	
2	4414	46,1	muuttuja b:	70,263		41,2	
3	4450	37,0	vastaavuusfunktio:	$R = 0,0066 * V_i + 70,263$		40,9	
4	4457	40,5	STANDARDIN EHTOJEN TÄYTTÄMINEN:			40,9	
5	4568	37,7	vastaavuusfunktion otoskorrelaatio $r > 0,7$ :			-0,269	40,1
6	4639	44,9	otoshajonnan suhde ulosvetokoe- tuloksien keskiarvoon $S/R_{koe} < 0,15$ :			0,093	39,7
7	4655	37,4					39,6
8	4656	34,3					39,6
9	4665	42,0					39,5
10	4691	41,2					39,3
11	4705	44,2					39,2
12	4741	35,9					39,0
13	4842	37,2					38,3
keski- arvo	4599	39,9			keski- arvo	39,9	

Yleisesti ottaen, kun vastaavuusfunktiota ei pystytty rakentamaan ensi yrittämällä, tehdään lisää tulospareja ja joko lisätään niitä olemassa olevaan taulukkoon tai korvataan taulukon tuloksia uusilla. Kun tilanne on se, että otoskorrelaatio on väääräsuuntainen eikä vähänkään luotettavalla puolella, on syytä harkita kokonaan uuden testisarjan suorittamista samalla analysoiden, mitä meni pieleen edellisessä testisarjassa ja mitä täytyy korjata tai muuttaa ennen uusiin testeihin ryhtymistä.

Kun kaikki tulokset saatiin käsiteltyä, siirryttiin niiden analysointiin ja siihen, mitä pohjaa kyseinen tutkimus on luonut mahdolliselle jatkotutkimustoiminnalle.

## 7 Tuloksien analyysi ja yhteenveto

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää betonin puristuslujuuslukemien erot, kun puristuslujuuden määrittämiseen käytetään erilaisia koemenetelmiä. Erilaisten kokeiden kautta saadut lujuustulokset muutettiin vastaamaan 150 mm kuutiolujuuksia Venäjän standardien mukaan. Sekä betonin A että betonin B tulokset koottiin taulukkoon 14.

Taulukko 14. Eri menetelmillä saadut betonien A ja B puristuslujuuslukemat.

Koemenetelmä	Kuutiolujuus [MPa]	
	Betoni A lujuusluokka B35	Betoni B lujuusluokka B30
Esivalmistetut koekappaleet	46,5	41,9
Poranäytteistä valmistetut koekappaleet	34,9	40,3
Ulosvetokoe	41,0	39,9
Ultraäänen etenemisnopeus	41,0	–

Kummankin betonin koekuutiotulokset eivät aiheuttaneet mitään epäilyjä: lujuustaso oli normaalia luokkaa eikä korostunut tehtaan tilastoista mitenkään. Poranäytteet herättivät sen sijaan kysymyksiä: betonin A poranäytteiden täytyi näyttää parempia lujuustuloksia kuin betonin B, mutta näin ei kuitenkaan käynyt, joten oli syytä analysoida tuloksia tarkemmin.

### 7.1 Poranäytteiden tuloksien analyysi

Ensin kiinnitettiin huomiota siihen, että poranäytteistä valmistettujen koekappaleiden 1194-2 (betoni A) ja 1196-1 (betoni B) korkeudet määräisivät kertoimen  $\eta_1$  olemaan 1,04 sen sijaan, että se olisi 1,0. Näin ollen lujuustuloksiin tuli neljä prosenttia lisää, kun lieriötulokset muunnettiin kuutiolujuuksiksi standardin mukaisella kaavalla. Kuitenkin se, että toinen lieriö tuli 0,01 mm liian korkeaksi ja toinen 0,2 mm liian korkeaksi, päätettiin jättää huomioimatta ja standardin mukaisia kertoimia käyttämättä: interpoloimalla standardin kerrointaulukkoa (tämän raportin taulukko 7) saatiin kertoimen  $\eta_1$  arvoksi noin 1,0067 eli koekappaleiden toteutuneisiin tuloksiin olisi lisättävä 0,67 prosenttia lujuutta eikä 4 %. Kun kyse olikin nyt niin pienestä prosenttiluvusta, päätettiin pitää poranäytelujuudet sellaisinaan kertoimia käyttämättä ja näin betonin A kahden rakennekoekappaleen keskiarvoksi tuli 34,3 MPa ja betonin B vastaavaksi tulokseksi 39,6 MPa. Tulostaulukkoon (taulukko 14) syötettiin uudet lukemat ja lopulliseksi tulostaulukoksi muodostui taulukko 15.

Taulukko 15. Eri menetelmillä saadut betonien A ja B puristuslujuuslukemat. Korjattu poranäytetuloksien osalta.

Koemenetelmä	Kuutiolujuus [MPa]	
	Betoni A lujuusluokka B35	Betoni B lujuusluokka B30
Esivalmistetut koekappaleet	46,5	41,9
Poranäytteistä valmistetut koekappaleet	34,3	39,6
Ulosvetokoe	41,0	39,9
Ultraäänen etenemisnopeus	41,0	–

Kun koetuloksia tutkittiin jokaista erikseen, huomiota herätti heikoin tulos ja ulkopuolisen laboratorion henkilökunnan ottama valokuva (kuva 20), jonka perusteella ajateltiin, että koekappale kesti pienempää kuormaa itse koekappaleessa esiintyvien virheiden takia: halkeama meni lieriön sisään joutuneen pienen puupalasen ja valun yhteydessä muodostuneen kolon läpi, eli nämä kaksi vikaa saattoivat huonontaa tulosta. Näin ei kuitenkaan ollut: viallinen koekappale olikin numeroltaan 1196-2 ja sen tulos puristuskokeessa oli 39,9 MPa. Toisen samasta poranäytteestä valmistetun koekappaleen tulos oli 40,8 MPa. Koekappaleessa esiintyneet viat siis mahdollisesti vaikuttivat lujuustulokseen, mutta eivät ainakaan merkittävästi. Tämän pohjalta päädyttiin siihen, että erittäin pienet tiivistysvirheet eivät vaikuta loppulujuuteen, jos niitä ei esiinny koko rakenteessa erittäin tiheään. Kuten aiemmin tämän raportin luvussa 5.5.1 jo todettiin, tutkimusta varten valettujen palkkien tiivistystyön tulosta voidaan sanoa normaaliksi ja työmaakäytäntöjä vastaavaksi, mutta ei kuitenkaan esimerkilliseksi.



Kuva 20. Betonin B poranäytteestä valmistetut koekappaleet puristuskokeen jälkeen. Vasemmanpuoleisessa koekappaleessa on kaksi vikaa: pieni puun pala ja kolo, joiden kautta kulkee puristuksessa muodostunut halkeama. Näistä virheistä huolimatta, kyseisen koekappaleen puristuskokeen tulostaso ei poikkea merkittävästi toisen, virheettömän koekappaleen tulostasosta.

Liian vähän puristusta kestänyt koekappale kesti vain 29,4 MPa:n puristuspainetta. Itse koekappaleesta ei kuitenkaan löytynyt mitään sellaista vikaa, josta voitaisiin päätellä, että poraus on epäonnistunut tai valun aikana on tehty virheitä. Venäjän normien mukaan kaksi rakennekoekappaletta riittää, kun käytetään lieriöitä, joiden halkaisija on yli 90 mm, ja näiden kahden tuloksen keskiarvo on betonin puristuslujuus. Mitä pienempiin halkaisijoihin siirrytään, sitä enemmän tarvitaan koekappaleita, mutta näissä tapauksissa keskiarvoa ei lasketakaan enää kaikista tuloksista, vaan huonoin tulos jätetään aina pois. Kun toinen betonin A rakennekoekappaleista kesti puristusta 39,2 MPa ja kyseisen betonin lujuusluokka on B35, voidaan olettaa, että kolmas rakennekoekappale olisi kestänyt suunnilleen saman verran. Tämän tilanteen pohjalta päädyttiin siihen, että kokeita suorittavan insinöörin onkin syytä käyttää vähintään kolmea koekappaletta: kahden kappaleen tilanteessa viallisen koekappaleen riski ei kompensoidu mitenkään, kun taas kolmen tai useamman koekappaleen käyttö kumoaa riskin. Toisin sanoen, kahta koekappaletta käytettäessä virhevara on nolla ja kolmen koekappaleen tapauksessa virhevaraa on kokonainen kolmasosa. Varsinkin kun päällä on sellainen tilanne, jossa betonin tilaajan ja betonitehtaan välillä on erimielisyyksiä betonin laadusta, kokei-

ta suorittavan betonitehtaan on todellakin syytä perustaa lujoustutkimuksensa useampaan poranäytteeseen. Jos tässä tutkimuksessa esiintynyt tilanne olisi tapahtunut työmaalla, joka valittaa betonin huonosta laadusta ja aikoo mennä oikeuteen, tällainen tulos olisi virallinen ja jatkotutkimuksista olisi pitänyt sopia pitkään, koska koemenettely oli kuitenkin standardin mukainen eikä standardi sano, että tällaisessa tilanteessa pitäisi suorittaa lisää kokeita. Toisaalta, melkein 10 MPa:n ero samasta poranäytteestä valmistettujen koekappaleiden välillä on erittäin suuri hajonta, ja standardeihin olisi syytä harkita lisäystä, jonka mukaan tuloksien käytettävyydelle olisi olemassa tietty hajontaraja: esimerkiksi niin, että kokeiden tuloksien eron ollessa yli 5 MPa pitäisi tehdä ainakin yksi lisäkoke ja jättää huonoin tulos pois – niin kuin se tehdään Venäjällä aina, kun käytössä on kolme tai enemmän koetulosta. Kun tällaista normia ei kuitenkaan ole, kokeita suorittavan insinöörin on todellakin harkittava tulevaa koekappalemäärää erittäin tarkkaan kokeita suunnitellessaan: käytetäänkö yli 90 mm halkaisijan lieriöitä standardien mukaisilta lisäkertoimilta välttyen vai siirrytäänkö pienempiin teräkokoihin ja jätetään koekappaleille virhevara.

## 7.2 Ultraääni, ulosvetokoe ja niistä saatujen tuloksien luotettavuus

Ulosvetokokeen ja ultraäänen etenemisnopeuden perusteella saatujen tuloksien keskiarvot ovat luonnollisesti samaa suuruusluokkaa, koska ultraäänen tulokset perustuvat vastaavuusfunktioon, joka rakennettiin ulosvetokoetuloksiin perustuen. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että ultraäänen etenemisnopeuden perusteella lasketut tulokset tulevat isossa mittakaavassa olemaan samanlaisia niiden tuloksien kanssa, joihin perustuen vastaavuusfunktio rakennettiin.

Täysin aiheellista on ajatella, että epäsuoran menetelmän tuloksien vastaavuus täytyy rakentaa suoran testausmenetelmän tuloksiin perustuen. Ulosvetokoetta ei voida sanoa mekaanisesti suoraksi koemenetelmäksi: puristuslujuudesta puhuessa, suora menetelmä tarkoittaa betonin puristamista. Venäjän standardeissa ulosvetokoe luokitellaan kuitenkin suoraksi rikkomattomaksi menetelmäksi ja vastaavuuksia muodostetaan työmailla useimmiten juuri tähän menetelmään perustuen. Kuitenkin, kun betonin puristuslujuuden oikeaa arvoa eli niin sanottua viimeistä totuutta haetaan aina nimenomaan poranäytteiden tuloksista, on syytä harkita, mihin kannattaa rakentaa minkä tahansa epäsuoran menetelmän vastaavuus. Ulosvetokoe on hyvä tapa betonin puristuslujuuden arviointiin, mutta sitä on kuitenkin erittäin vaikea sanoa täysin luotettavaksi mene-



telmäksi. Toisaalta, vaikka vastaavuuden määrittäminen poranäytteiden tuloksiin perustuen vaikuttaa kaikista loogisimmalta tavalta, se on työlästä: poranäytteet täytyy ensin porata painavalla koneella ja kalliilla terällä, minkä jälkeen viimeistellä näytteiden päät ja lisäksi toistaa samat toimenpiteet vähintään kerran kuukaudessa tekemällä vähintään kolme porausta kerrallaan. Työmaalla työskentelevä kokeita tekevä insinööri voisi ennen lopullista päätöstä kysyä itseltään ainakin seuraavia kysymyksiä:

1. Mitä menetelmää tullaan käyttämään silloin, kun betonin lujuus herättää epäilyjä? Vastaavuusfunktio on syytä rakentaa nimenomaan sen menetelmän tuloksiin pohjautuen.
2. Miltä rakenteiden pintojen tulee näyttää ja onko varaa jättää rakenteisiin ulosvetokokeiden tekemiä pommitusjälkiä? Poranäytekohtien paikkaaminen on työlästä, mutta lopputulos on aina nätimpi kuin laastilla korjattu ulosvetokokeen jälki.
3. Mitä muita epäsuoria menetelmiä on olemassa?

Jälkimmäistä kysymystä ajatellessa voidaankin miettiä esimerkiksi kimmovasaraa. Kimmovasaratestin suorittamista pidetään usein työläämpänä menetelmänä kuin ultraäänen etenemisnopeuden mittaamista, koska ennen kimmovasaratestiä betonin pinnasta joudutaan hiomaan sementtiliima pois ja itse testikin vaatii sen suorittajalta käsiensä hyvää fyysistä kuntoa. Toisaalta, ultraäänen etenemisnopeuteen vaikuttaa huomattavasti enemmän tekijöitä, joita ovat muun muassa käytetyn betonimassan maksimiraekoko ja ilmamäärä, joita ei voida koskaan olettaa täydellisen tasaisesti rakenteessa jakautuneiksi, joten harkinnan varaa löytyy: tullaanko käyttämään ultraäänen etenemisnopeutta ja varautumaan siihen, että tulokset eivät ole koskaan täysin luotettavia, vai käytetäänkö työläämpää kimmovasarakoetta ja ollaan luotettavammalla puolella. Syy, minkä takia tässä kritisoidaan ultraäänen luotettavuutta, on se, että testin aikana ei päästä koskaan näkemään, minkälaisen matkan kautta ultraääniaalto on joutunut kulkemaan: onko sinne päässyt ilmakuplia tai raudoitusta, minkälaista kiviainesta esiintyy juuri kyseisessä kohdassa ja kuinka paljon testikohdassa on sementtiliimaa. Kimmovasaratestissä testikohdan betoni on puolestaan aina näkyvässä, ja pinnan valmistelusta riippuu myös tulos: kun testauskohta valitaan ja valmistellaan standardien mukaan, samasta kohdasta porattu näyte antaa yleensä hyvin samanlaisen puristuslujuuskoetuloksen.

### 7.3 Aiheita jatkotutkimuksille

#### 7.3.1 Paras epäsuora koemenetelmä ja paras vastaavuus

Tämä tutkimus antoi aiheen jatkotutkimukselle, jossa voitaisiin selvittää parhaiten toimiva epäsuora betonin puristuslujuuden määrittämismenetelmä Venäjän standardien mukaisessa rakentamisprosessissa. Tällaiseen tutkimukseen tulisi sisällyttää ultraään lisäksi myös kimmovasarakoe, joka on melkein yhtä suosittu Venäjän työmailla kuin ultraäänikin. Jatkotutkimuksen kulku voisi olla seuraava:

1. Valetaan testirakenteet. Niitä on syytä valaa enemmän kuin tässä tutkimuksessa, jotta tutkimukseen saataisiin enemmän betonilaatuja ja testattavia pintoja: esimerkiksi viisi eri betonia ja jokaiselle kaksi samasta sekoituksesta valettua koepalkkia.
2. Jokaisesta betonista tehdään vähintään 15 koekuutiota. Käytetään mieluummin 150 mm:n koekuutioita, jotta vältetään lisäkertoimilta.
3. Sekä kimmovasarakokeelle että ultraäänien etenemisnopeudelle muodostetaan vastaavuusfunktiot niin, että kummallekin epäsuoralle menetelmälle muodostuu kolme vastaavuusfunktiota: koekuutiotesteihin, poranäytetesteihin ja ulosvetokokeisiin perustuen.
4. Suoritetaan uudet epäsuorat kokeet ja niiden tuloksista lasketaan betonin puristuslujuus aiemmin määritettyjen vastaavuusfunktioiden avulla.
5. Lopuksi epäsuorilla menetelmillä testatuista kohdista otetaan poranäytteet, koska juuri ne voidaan pitää niin sanottuna viimeisenä totuutena, ja tarkistetaan, minkä menetelmän perusteella muodostetut vastaavuudet toimivat parhaiten. Jos rakenteen paksuus riittää, ennen poranäytteen ottamista voidaan suorittaa myös ulosvetokokeet ja selvittää, kuinka paljon sen tulos tulee poikkeamaan rakennekoekappaleen tuloksesta.

Tällaisen jatkotutkimuksen perusteella työmailla voitaisiin suunnitella toimivampia laadunvalvontamenettelyjä, jotka aiheuttaisivat vähemmän betonin puristuslujuutta koskevia epäilyjä.

### 7.3.2 Ulosvetokokeen luotettavuustutkimus

Toinen jatkotutkimuksen aihe on niiden asioiden selvittäminen, jotka vaikuttavat ulosvetokoe tuloksiin. Ulosvetokoe herätti paljon kysymyksiä tämän tutkimuksen aikana, varsinkin kun otetaan huomioon se, että EN-standardissa ulosvetokoetta ei pidetä suoraan koemenetelmänä ja Venäjällä pidetään. Se, mihin Venäjän normien mukaan ulosvetokokeen antamat tulokset perustuvat, antaa aiheita epäillä, että ulosvetokoe on todellakin syytä luokitella epäsuoraksi koemenetelmäksi – jo pelkästään siitä syystä, että logiikan mukaan betonin puristuslujuuden määrittämiseen tarkoitetun suoran menetelmän on perustuttava nimenomaan betonin puristamiseen eikä sen oletettuun riippuvuuteen tietynlaisen ankkurin ulosvetovoimaan.

Epäilyt syntyivät siitäkin, että tässä tutkimuksessa testattujen betonien koekuutioiden puristuskokein selvitetty lujuus poikkesi ulosvetokoe tuloksista positiiviseen suuntaan sitä enemmän, mitä enemmän betoneissa oli ilmaa. Kun käytössä on vain pieni määrä tuloksia, asiasta ei voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä, mutta jatkotutkimuksin voitaisiin tarkistaa sellainen teoria, jonka mukaan ulosvetokokeiden tuloksiin vaikuttaa muitakin tekijöitä kuin vain betonin puristuslujuus. Yksi tällaisen teorian ajatuksista on se, että betonin ilmamäärän kasvaessa tehollinen vetopinta-ala pienenee, jos katsotaan betonin poikkileikkausta. Lisäksi tuloksiin voivat vaikuttaa esimerkiksi betonin maksimiraekoko, vesisementtisuhte, käytettyjen kiviainesten muoto ja niin edelleen.

Ulosvetokokeen luotettavuutta käsittelevä tutkimus voidaan toteuttaa seuraavissa vaiheissa:

1. Valitaan tietty määrä betonireseptejä, esimerkiksi viisi, joiden lujuusluokka on sama, mutta joissa esiintyy eroja ilmamäärän, vesisementtisuhteen, maksimiraekoon ja mahdollisesti myös muiden tekijöiden osalta.
2. Valetaan näistä betoneista koerakenteet ja joka betonista valmistetaan koekuutiot.
3. Jokaisesta rakenteesta tehdään ulosvetokokeet ja otetaan poranäytteet. Koe materiaalia on oltava riittävä määrä, esimerkiksi 15 koetta jokaista koemenetelmää kohden joka koerakenteessa.

4. Lasketaan koetuloksien keskiarvot ja hajonta.
5. Analysoidaan tuloksia. Tällaisen tutkimuksen alkuoletuksena voi olla sellainen ajatus, että suuremman ilmamäärän betoneissa ulosvetokokeen tulokset tulevat olemaan alhaisempia kuin pienemmän ilmamäärän betoneissa, vaikka näiden betonien poranäytteiden tulokset olisivat samanlaisia.

Kyseisessä tutkimusta on syytä pitää testattavien betonien lujuusluokka muuttumattomana, ja esimerkiksi tästä tutkimustyöstä poiketen käyttää joka rakenteessa samankokoista ankkuria. 16-millisen ankkurin käyttö on helpompaa tehtävän poraustyön takia, mutta kun normit sallivat sen käytön vain yli 40 MPa:n betoneissa, tutkittavien betonien pitää täyttää tämä vaatimus. Toisaalta, tutkimusta voitaisiin laajentaa: niin, että käytössä on viisi erilaista, mutta samaa lujuusluokkaa olevaa betonia ja ne testataan 16-millillä ankkurilla, ja vielä viisi pienemmän lujuusluokan betonia, esimerkiksi B25, ja ne testataan 24-millillä ankkurilla. Näin voitaisiin selvittää myös ankkurin koon vaikutus ulosvetokokeiden tuloksiin: kumman ankkurin käytössä tulee enemmän hajontaa ja kumman ankkurin kanssa suoritettujen kokeiden tulokset ovat lähimpänä poranäytteiden puristuskokeiden tuloksia.

#### 7.4 Johtopäätökset

Tärkein johtopäätös, joka tehtiin tämän tutkimuksen tuloksena, on se, että yksi huono tulos betonirakenteen puristuslujuustestissä ei vielä välttämättä tarkoita, että betonin lujuus on riittämätön koko rakenteessa. Tämä tarkoittaa sitä, että joka kerta, kun asiakastyömaalta tulee valitus betonin riittämättömästä puristuslujuudesta, tehdään edustajien on syytä tulla työmaalle ottamaan omia poranäytteitä kaikkien standardien mukaan ja kaikista rakenteista, jotka valettiin samasta kuormasta.

Erittäin kyseenalaiseksi jää tänäkin päivänä se hetki, jona päättyy betonitehtaan vastuu sen valmistamasta betonista. Niin Suomessa kuin Venäjälläkin tehdas valmistaa koe-kappaleet silloin, kun massa on kaadettu myllystä betoniautoon. Kun työmaa valittaa betonin riittämättömästä lujuudesta ja tehdas on kuitenkin hoitanut sekä betonin toimituksen että mahdollisesti myös pumppauksen itse, vastuun päättymishetki tulee erittäin tärkeäksi: juridisesti ottaen, tehdas vastuu päättyy silloin, kun tehdas on hoitanut kaikki sille kuuluvat tehtävät eli siinä vaiheessa, kun betonimassa putoaa muottiin, joten koe-

kappaleidenkin on oltava tehty juuri silloin. Kiistatilanteissa tehdas kuitenkin näyttää omia koekappaletuloksia, mutta nämä koekuutiot on valmistettu kesken toimitusprosessin eikä niillä voida näyttää, että betoni on saapunut vaatimukset täyttävänä myös työmaalle. Tämän vuoksi tehtaiden on syytä tarjota asiakkailleen esimerkiksi sellaista palvelua, jossa tehdään laborantti valmistaisi koekappaleita työmaalla juuri sillä hetkellä, jona tehdään vastuu päättyy. Tällainen menettely voi toimia erinomaisena tehdään tukena silloin, kun on käynnissä isoja työmaita ja on aihetta varautua siihen, että koko työmaan aikana tulee olemaan ainakin yksi valitus betonin riittämättömästä puristuslujuudesta.

Se, minkä takia tehdään on oltava erittäin tarkka siitä, missä vaiheessa sen vastuu päättyy, selittyy tekijöillä, jotka vaikuttavat betonin puristuslujuuteen rakenteessa. Kuten tässä opinnäytetyössä jo todettiin, betonitehdas ei voi koskaan yksin taata betonin riittävää loppulujuutta rakenteessa, koska työmaatuotanto vaikuttaa lopulliseen lujuuteen erittäin merkittävästi. Kuten vuonna 2016 aiheeksi nousseiden alhaisten betonilujuuksien loppuselvityksessä muistutetaan, työmaalla tapahtuvista virheistä johtuen rakenteessa oleva betoni voi menettää 5...30 % lujuudesta – siis jonkun yhden tekijän vaikutuksesta, puhumattakaan työmaalla mahdollisesti tapahtuneista virhehdistelmistä. Suurimpia lujuuskatoja esiintyy, kun betoni kovettuu kylmissä olosuhteissa: vaikka ensimmäisen vuorokauden aikana hydrataatioreaktio saataisiin käyntiin, sen on annettava myös jatkua. Kun sitä ei tapahdu, betonin ollessa 28 vuorokauden ikäistä se ei välttämättä ole vielä ehtinyt saavuttaa sille asetettuja lujuusvaatimuksia. Toinen erittäin tärkeä tekijä on betonin oikeaoppinen tiivistäminen: huonosti toteutettuna se voi saada aikaan tilanteen, jossa betonin rakennelujuus on 20 % pienempi kuin se olisi ollut, jos tiivistystyö hoidettaisiin kunnolla. Myös jälkihoidolla työmaa voi vaikuttaa betonirakenteen lopullisiin ominaisuuksiin niinkin negatiivisesti, että lujuudesta katoaa 15 %. [16, s. 17-18.]

Valitukset riittämättömästä lujuudesta tulevat kuitenkin tehtaille. Edellä selostetut asiat vain vahvistavat sitä ajatusta, että tehdään on suoritettava laadunvalvontatoimenpiteensä mahdollisimman lähellä valua, vaikka joissakin tilanteissa se voi olla haastavaa ja kallista. Toisaalta, kun käytännöt tulevat muuttumaan vasta vuosikymmenien kuluttua, nykypäivän tilanteessa on syytä lähteä tekemään enemmän kokeita: kun tehdas saa työmaalta valituksen, täytyy kerätä lisää näyttöä betonin toteutuneesta lujuudesta. Huutavia esimerkkejä ovat ne tapaukset, joissa samasta kuormasta valetut rakenteet näyttävät hyvin erilaisia lujuustuloksia. Tämä on harmittavan yleistä Venäjän työmailla, mis-

sä esiintyy säännöllisesti sitä, että betoniin lisätään vettä kokemattomien työmiesten aloitteesta tiivistystyön helpottamiseksi. Tieto lisäystä vedestä menee harvoin työnjohdolle saakka, jos työnjohto ei ole valvomassa koko prosessia minuutti minuutilta ja keskittyy enemmän paperitöihin kuin työmaakäytäntöihin. Huono tiivistäminen ja puutteellinen jälkihoito saavat myös lujuuskatoja aikaan, ja vastaväitteenä työmaan valituksille tehdas voi ottaa näytteitä rakenteiden eri kohdista – niin, että betonin epätasalaatuisuus tulee ilmi tuloksien merkittävästä hajonnasta.

Tehtaan vastuun päättymishetkeen voidaan vaikuttaa myös sopimuskeinoin, mutta on täysin luonnollista, että harva asiakas suostuu tällaiseen menettelyyn. Se, mitä tehdas voi aina tarjota, on työmaalla tapahtuva laadunvalvontapalvelu, joka tulee maksamaan työmaalle lisää rahaa, mutta samalla tulee myös vähentämään kiistatilanteita. Kun kyseessä on iso paikallavalutyömaa, joita ovat melkein kaikki kerrostalotyömaat esimerkiksi Pietarissa, tällainen laadunvalvonta on kaikkien osapuolten etu. Tehokkaimmillaan se tulee toimimaan silloin, kun betoniin liittyvää laadunvalvontaa tekevät sekä työmaan että betonitehtaan insinööri jatkuvassa yhteistyössä. Lisäksi tehtaalta lähetetty laborantti tulee olemaan se henkilö, jolla on suurin intressi nähdä hyviä betonin puristuslujuuden koetuloksia – ja tämän perusteella hän tulee varmasti huomauttamaan työmaan henkilöstöä esimerkiksi huonosta jälkihoidosta, riittämättömästä tiivistystyöstä ja muista rakenteen loppulujuuteen vaikuttavista tekijöistä, joita hän tulee havaitsemaan työmaalla.

## 7.5 Loppusana

Lopuksi todettakoon, että tutkimuksen tulokset antoivat hyvän pohjan jatkotutkimuksille, ja tätä voidaan pitää tutkimuksen tärkeimpänä saavutuksena. Lisäksi tähän tutkimukseen olisi ollut syytä lisätä myös kimmoarvokoe, mitä ei kuitenkaan tehty siitä syystä, että betonin lujuuden määrittäminen ultraäänikokein on hieman suositumpi tapa Venäjän työmailla.

Kuten monta kertaa ja monessa tutkimuksessa jo todettiin, betonitehtaiden on syytä yrittää siirtää laadunvalvontansa aina lähemmäs valuja. Vaikka se voi olla kallista, täytyy muistaa, että työmaan työtavat voivat vaikuttaa betonin loppulujuuteen erittäin merkittävästi – eikä melkein koskaan parempaan suuntaan. Tästä voidaan tehdä sellainen johtopäätös, että paras betonitöiden valvoja on se henkilö, jolla on suora intressi tule-



vien lujuustuloksien kelpoisuudesta. Olisi toivottavaa, että vuosien kuluttua näkisimme-kin työmailla betonitehtaiden insinöörejä valmistamassa koekappaleita, tekemässä ilmamäärä- ja kartiopainumamittauksia, päättämässä tarpeen mukaan betonin notkistamisesta ja valvomassa koko betonityöprosessia: valutyöstä jälkihoitoon.

## Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja 2018 by 201. Vaasa: BY-koulutus Oy.
- 2 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 1979. Betonitekniikka RIL 119. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y.
- 3 Suomen Betoniyhdistys ry. 2009. Betonin kiviainekset 2008 by 43. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- 4 Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. Betoninormit 2016 by 65. Vaasa: BY-koulutus Oy.
- 5 Suomen Betoniyhdistys ry. 2017. Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016 by 68. Vaasa: BY-koulutus Oy.
- 6 Venäjän GOST-standardit. 2014. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Поправками).
- 7 Venäjän GOST-standardit. 2019. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
- 8 SFS-EN 13791. 2007. Betonin puristuslujuuden arviointi rakenteista ja rakenneosista.
- 9 SFS-EN 12504-1. 2019. Testing concrete in structures. Part 1: Cored specimens. Taking, examining and testing in compression.
- 10 Venäjän GOST-standardit. 2019. ГОСТ 28570-2019 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций.
- 11 SFS-EN 12504-2. 2013. Betonin testaus rakenteista. Osa 2: Rikkomaton aineen-koetus. Kimmoarvon määrittäminen kimmovasaralla.
- 12 Venäjän GOST-standardit. 2015. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
- 13 Venäjän GOST-standardit. 2010. ГОСТ 18105-2010 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
- 14 Venäjän GOST-standardit. 2012. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

- 15 Gregor Trtnik, Franci Kavčič, Goran Turk. 2008. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. Ljubljana, Slovenia.
- 16 Mäkikyrö, Tapani. 2017. Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, taustalla vuoden 2016 lujuuskadot – Selvitysmiehen loppuraportti ja suositukset. Rakennusteollisuus RT ry.

## Lämmönmittausloggerin säätäminen testo-ohjelmassa

fiesto 176 T4 - Luj

aBetomix 40717525

Start page

Instrument

Evaluating

Settings

Select instrument

Configure instrument

Show instrument status

Operation settings

Instrument configuration

Recording

Start criteria

☐ Start time
 

18.07.2019 11:28:23

☒ Start button on instrument: Hold depressed for at least 3 seconds
 

Edit formulas

Stop criteria

☐ Memory full
 ☒ Circular buffer memory
 ☐ Number of measurement values
 

1

Unit

Temperature

°C °F

Storage cycle

Hours

2

Minutes

0

Seconds

0

Measuring interval

Hours

2

Minutes

0

Seconds

0

Channel settings

1

Channel designation

10 keski

Sensor type

(K) NiCr-Ni thermol

Lower limit value [°C]

-5.0

Upper limit value [°C]

70.0

2

Channel designation

10 reuna

Sensor type

(K) NiCr-Ni thermol

Lower limit value [°C]

-5.0

Upper limit value [°C]

70.0

3

Channel designation

20 keski

Sensor type

(K) NiCr-Ni thermol

Lower limit value [°C]

-5.0

Upper limit value [°C]

70.0

4

Channel designation

20 reuna

Sensor type

(K) NiCr-Ni thermol

Lower limit value [°C]

-5.0

Upper limit value [°C]

70.0

## Koepalkkien lämmönkehityskäyrät

